



Quantification par analyse d'images de la granulométrie des roches fragmentées : amélioration de l'extraction morphologique des surfaces, amélioration de la reconstruction stéréologique

Souhaïl Outal

► To cite this version:

Souhaïl Outal. Quantification par analyse d'images de la granulométrie des roches fragmentées : amélioration de l'extraction morphologique des surfaces, amélioration de la reconstruction stéréologique. Géologie appliquée. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006. Français. NNT : 2006ENMP1355 . pastel-00579926

HAL Id: pastel-00579926

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00579926>

Submitted on 25 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Collège Doctoral
T060601 SOUT

N° attribué par la bibliothèque

|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE PARIS
SPÉCIALITÉ : TECHNIQUES ET ECONOMIE DE L'EXPLOITATION DU SOUS-SOL

présentée et soutenue publiquement par

Souhaïl OUTAL

le 01 Juin 2006

**Quantification par analyse d'images de la granulométrie des roches fragmentées :
amélioration de l'extraction morphologique des surfaces,
amélioration de la reconstruction stéréologique**

Directeurs de thèse : Serge BEUCHER et Jacques SCHLEIFER

Jury

M. Dominique JEULIN	Professeur	Ecole des Mines de Paris	Président
M ^{me} Joëlle RISS	Professeur	Université de Bordeaux	Rapporteur
M. Éric PIRARD	Professeur	Université de Liège-Belgique	Rapporteur
M. Serge BEUCHER	Docteur	Ecole des Mines de Paris	Examineur
M. Peter MOSER	Professeur	Montanuniversität Leoben-Autriche	Examineur
M. Jacques SCHLEIFER	Docteur	Ecole des Mines de Paris	Examineur
M. Ricardo CHAVEZ	Docteur	Nitro-Bickford	Membre invité

Centre de Géosciences - Ecole des Mines de Paris
Centre de Morphologie Mathématique - Ecole des Mines de Paris
35, Rue Saint-Honoré - 77305 Fontainebleau Cedex

A Amina et Abdelhak
A Jalal & Wajih

Souhaïl

Remerciements

Ce travail de thèse n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide d'un certain nombre de personnes. Qu'il me soit ici permis de remercier

M. Damien GOETZ, Directeur du centre de Géosciences, et M. Fernand MEYER, directeur du Centre de Morphologie mathématique, qui m'ont accueilli dans leurs laboratoires et qui m'ont permis de me former par la recherche pendant ces trois années et demi.

M. Dominique JEULIN, Professeur à l'École des Mines de Paris, pour l'intérêt qu'il a toujours témoigné pour ce travail, et qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.

M^{me} Joëlle RISS, Professeur à l'Université de Bordeaux, et M. Eric PIRARD, Professeur à l'Université de Liège en Belgique, d'avoir accepté de participer à ce jury en tant que rapporteurs.

M. Peter MOSER, Professeur à l'université de Léoben en Autriche, d'avoir accepté de participer à ce jury en tant qu'examinateur.

M. Ricardo CHAVEZ, Docteur de l'École des Mines de Paris, d'avoir accepté d'être membre invité dans ce jury. Ses précédents travaux sur la granulométrie des roches par analyse d'images ont été le point de départ de nombreuses améliorations scientifiques de la technique de mesure.

MM. Serge BEUCHER, Chef de groupe au centre de Morphologie, et Jacques SCHLEIFER, adjoint au Directeur au centre de Géosciences, mes deux directeurs de thèse qui m'ont fait découvrir la morphologie mathématique et l'analyse granulométrique des roches fragmentées, et qui m'ont accordé leur confiance et une autonomie dans mon travail. Sans leurs précieux conseils, leurs critiques et leurs encouragements ce travail n'aurait sans doute pas abouti.

M. Bruno TESSIER, Enseignant-chercheur au Centre de Géosciences pour ses conseils et sa collaboration à ce travail.

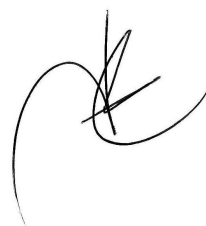
Tous mes collègues du centre de Géosciences et du CMM qui ont contribué de près ou de loin à cette thèse, et qui par leur sympathie et leur bonne humeur ont pu rendre le travail si agréable : Rudianto Ekawan, Jad Wakim, Ahmed Rouabhi, Caroline Bernard-Michel, Pierre Mahé, Meri Picq-Gomez, Romain Lerallut, Jean Serra, Raffi Enficiaud, Costin Caciuc, Michel Tijani, Dmitri Gordine, Michel Duchene, Olivier Stab, Faouzi Haj Hassan, Riadh Bouelag, Joël Akowanou, Hédi Sellami, Yacine Sail, Mounir chouikhi, Aymane Salmi, Alain Quantin, Brigitte Breda, Jesus et Linda Angulo, Mouna Er-rhazi, Stephane Menand, Hugue Accarie, Nabil Hajjam, Catherine

Moysan, Catherine Quantin, Marie-Philomène petitimbert, Sandrine Motte, Cyril Leipp, Jean-Claude Wiszniewski, Jean-Marie Migneau, Anne Levesque, Laurent Gerbaud ...

Ainsi que les anciens : Robert Nothnagel, Baptiste Miehe, Abdessalam Belaid, Hernan Mejia, Harald Freismuth, Fatiha Amerarene, David Brocas, Si hung Nguyen, Svetlana Bakoumenko, Amina Imadache, Jawad Bentaleb, Oliver Torres, Ludovic Macresi, Julia Kaplan, Sasko Jovanov, Youssef Bouchbaba, Abdurrahman Alhawi et Mohamed Aldabagh ...

Mes remerciements vont aussi à tous mes amis : Aïcha, Amine Elaouli, Zenaba, Jamal Saoud, Bouaouch Jawad, Kamal Elahrach, Omar Diop, Marie Alain, Anissa, Driss et Brahim, Abdelhafid, Mahmoud Assara, Taïb Kadiri, Jamila Belfaïza, Mounir et Samir, la famille Kasbari & Gaëlle, et la liste est longue!...

Fontainebleau, le 02 juin 2006

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, sweeping curve on the left and a more complex, scribbled shape on the right.

Souhaïl OUTAL

Sommaire

Introduction générale	4
I Présentation du problème	5
1 Mesure de la granulométrie des roches fragmentées	7
1.1 Granulométrie par tamisage : référence actuelle de la mesure	7
1.1.1 Taille et calcul des proportions granulométriques par tamisage	8
1.1.2 Problèmes rencontrés lors de la mesure de la distribution des tailles des grains	8
1.2 Granulométrie des roches par analyse d'images	9
1.2.1 Concept de taille pour l'analyse d'images	10
1.2.1.1 Taille déterminée par la méthode de la ficelle	10
1.2.1.2 Diamètre de Féret	10
1.2.1.3 Diamètre du cercle équivalent	11
1.2.2 Étapes de mesure par analyse d'image	11
1.2.3 Modèles mathématiques d'ajustement	13
1.2.3.1 Modèle de Rosin-Rammler	13
1.2.3.2 Calcul des paramètres du modèle de Rosin-Rammler à partir des données expérimentales	14
1.2.4 État de l'art de la mesure par analyse d'images	15
1.2.4.1 Logiciels de traitements	15
1.2.4.2 Erreurs de mesure liées à l'analyse d'images	18
1.3 Différences conceptuelles entre les deux techniques de mesure	22
1.4 Démarche générale adoptée et problèmes étudiés	22
1.4.1 Position du problème	22
1.4.2 Problèmes étudiés	24
1.5 Conclusion	25

II	Mesure des surfaces des fragments par analyse d'images	27
2	Extraction de l'information 2D	29
2.1	Opérateurs morphologiques de base	30
2.1.1	Érosion et dilatation	30
2.1.2	Gradient morphologique	31
2.1.3	Fonction distance	33
2.1.4	Ouverture et fermeture	33
2.2	Transformations utilisées pour le filtrage	36
2.2.1	Motivation : Bruit affectant les images de fragments de roches	37
2.2.2	Type de filtres	38
2.2.3	Transformation par reconstruction	38
2.2.3.1	Ouverture avec reconstruction	39
2.2.3.2	Bouchage de trous	41
2.2.4	Filtres alternés séquentiels	41
2.2.5	Granulométrie	42
2.2.6	Chapeau haut-de-forme	44
2.2.7	Remarque	45
2.3	Segmentation morphologique : la ligne de partage des eaux	45
2.4	Pré-filtrages des images de fragments de roches	48
2.4.1	Filtre linéaire	49
2.4.2	Filtres non-linéaires	51
2.4.3	Synthèse du pré-filtrage	55
2.5	Filtrage : amélioration du marquage	56
2.5.1	Modification de la pente de la fonction distance	56
2.5.2	Synthèse	64
2.5.3	Réduction des marqueurs améliorée : Sup des résidus des ouvertures	65
2.5.4	Synthèse du filtrage	82
2.5.5	Récapitulatif	83
2.6	Extractions des marqueurs et segmentation par LPE	84
2.6.1	Boules maximales inscrites par contrôle du Sup des résidus	84
2.6.2	Segmentation des images par LPE contrôlée	95
2.6.2.1	Gradients calculés sur l'image pré-filtrée	95

2.6.2.2	Gradients calculés sur la fonction granulométrique modifiée de l'image pré-filtrée	98
2.7	Conclusions	104
III Reconstruction de la granulométrie des roches à partir de l'analyse d'images		105
3	État de l'art du 3D	107
3.1	Cas de Split : modèle de taille et d'épaisseur	107
3.2	Cas de Wipfrag : fonction de reconstruction	109
3.3	Cas de FragScan : modèle des sphères	110
3.4	Discussion et démarche adaptée	111
4	Cas de non-recouvrement et non-chevauchement	113
4.1	Présentation des échantillons expérimentaux	113
4.1.1	Lot d'images N°1 : images J.-P. LATHAM	114
4.1.2	Lot d'images N°2	115
4.1.3	Lot d'images N°3	116
4.1.4	Lot d'images N°4	117
4.2	Concept de taille et méthode de tri pour les données 2D	120
4.3	Méthode de reconstruction par anamorphose	121
4.3.1	Principe de la méthode	121
4.3.2	Calcul de l'anamorphose pour le cas du modèle de Rosin-Rammler	121
4.3.3	Application de l'anamorphose aux échantillons expérimentaux	123
4.3.3.1	Résultats du lot N°1	124
4.3.4	Synthèse	133
4.3.5	Résultats du lot N°2	134
4.4	Méthode de reconstruction basée sur l'histogramme	136
4.4.1	Principe de la méthode et formulation mathématique	136
4.4.1.1	Problème de mise en correspondance des histogrammes : Loi des tailles	137
4.4.1.2	Reconstruction des volumes : Loi des épaisseurs	138
4.4.2	Considérations expérimentales	139
4.4.3	Validations expérimentales de la méthode des histogrammes	140
4.4.3.1	Calcul des deux lois de reconstruction à partir du lot N°3	140

4.4.3.2	Reconstruction de la granulométrie de l'échantillon N°4	144
4.4.4	Synthèse	149
5	Étude du problème de masquage entre fragments	153
5.1	Modèles de structures aléatoires	154
5.1.1	Descriptions générales	154
5.1.2	Modèle de feuilles mortes	154
5.1.3	Hypothèses de résolution pour le cas des roches fragmentées	155
5.2	Test du modèle pour le cas des roches fragmentées	156
5.2.1	Résolution par l'hypothèse du schéma Booléen	156
5.2.1.1	Démarche théorique	156
5.2.1.2	Traitements expérimentaux	160
5.2.2	Résolution par la statistique des grains intacts	166
5.2.2.1	Démarche théorique	166
5.2.2.2	Extraction des grains intacts : ombres portées par les fragments	167
5.2.2.3	Synthèse et limites	174
5.3	Conclusion du chapitre	176
	Conclusion et Perspectives	180
	Table des figures	189
	Liste des tableaux	191
	Références bibliographiques	191

”..Dès lors, cette affirmation la Terre tourne n’a aucun sens. . .ou plutôt ces deux propositions, la Terre tourne, et, il est plus commode de supposer que la Terre tourne, ont un seul et même sens.”

Henri POINCARÉ

Résumé

Cette recherche s'inscrit dans le cadre général du contrôle de qualité des processus utilisés en production minière, tels que le tir à l'explosif, le broyage et le concassage. Elle s'intéresse plus particulièrement à la quantification par traitement d'images de la granulométrie des roches fragmentées. Globalement, les développements menés portent sur l'amélioration des deux étapes les plus déterminantes de la mesure : l'extraction des contours des fragments de roches dans l'image (2D) et la reconstruction de la courbe granulométrique en volume (étape de stéréologie, 3D). Actuellement, le tamisage (ou plus généralement le criblage) est le moyen le plus utilisé pour la mesure de la granulométrie des roches fragmentées. Il constitue la **référence actuelle** de la mesure. En conséquence, toute mesure établie par traitement d'images sera validée sur la base des résultats du tamisage.

En ce qui concerne l'étape d'extraction des contours des fragments, le problème majeur qui se pose est celui du filtrage correct du bruit présent dans l'image. Dans un premier temps, de **nouveaux outils de filtrage**, basés sur les transformations morphologiques résiduelles, assez puissants et adaptés au cas des images de fragments de roches sont introduits et évalués. Dans un second temps, les **surfaces** des fragments sont extraites grâce à une segmentation de l'image, basée sur une **ligne de partage des eaux** contrôlée par les marqueurs extraits des filtrages. La **robustesse** et l'**automatisation** de la démarche sont validées sur plusieurs cas d'images de fragments de roches.

Le second problème abordé dans cette recherche est celui de la **reconstruction de la courbe granulométrique en volume** à partir des surfaces extraites par traitement d'images. Afin d'éviter l'occurrence de nombreux biais liés à cette étape, nous proposons un découpage en deux sous-problèmes, et ce, en fonction de la disposition des matériaux analysés (tas abattu, camion, convoyeur à bande) :

- dans le cas de faible recouvrement et chevauchement : un **modèle expérimental de reconstruction volumique** mettant en jeu les données des refus matériels (surface et volumes), et basé d'emblée sur les résultats de référence est développé. Les **deux lois des tailles et des épaisseurs** (lois de reconstruction) permettant d'attribuer une taille et un volume aux surfaces sont validées expérimentalement.
- dans le cas complexe de présence de masquage entre fragments : nous commençons par **émettre des hypothèses essentielles** à l'adaptation de la théorie des modèles de structures aléatoires à notre cas de fragments de roches. L'analyse des limites d'une application directe du **modèle aléatoire de feuilles mortes** (hypothèse du schéma booléen) nous

a amené à **élaborer une nouvelle méthode d'acquisition** basée sur une incidence à éclairément variable. S'inspirant de la technique du «shape-from-shading», elle permet d'obtenir une information supplémentaire sur le recouvrement (ombre portée entre fragments) pour l'application de la **statistique des grains intacts**.

Enfin, les résultats obtenus dans cette recherche pour les fragments en vrac mais aussi pour d'autres types d'images d'éléments granulaires, nous ont permis d'envisager d'ores et déjà une **valorisation** aussi bien auprès de l'industrie minérale et aussi dans d'autres domaines tels que l'agroalimentaire, pharmaceutique, cimenteries,...

Abstract

This research deals with a more general context of the quality control for some important operations in mining production, predominantly blasting, crushing and grinding. It is interested more in the granulometry quantification of the fragmented rocks by using image processing. In general, the development work is mainly related to the improvement of two most important stages of measurement : the contours extraction of the fragments at the image (2D) and the rebuilding of the 3D size-distribution-curve (stage of stereology, 3D). Nowadays, screening (or more general the sifting) is the most used and important process for measuring the granulometry of the fragmented rocks ; It is therefore considered as the **current reference** of measurement. Consequently, any measurement established by image processing will then be validated on the basis of screening's result.

With regard to the stage of contours extraction of fragments, the major problem is how to determine the correct filtering of the noise at the image. First of all, **new tools for filtering**, based on the residual morphological transformations, and rather powerful and adapted to the case of fragment images of rocks, are introduced and evaluated. The study, undertaken on grey level images, approaches the various aspects of the noise problems from a topographic point of view. **Surfaces** of the fragments are then extracted carefully with the help of a segmentation of the image. The extraction process is principally based on the construction of a **watershed** controlled by the markers, which are extracted by filtering. The **robustness** and the **automation** of the step are afterward validated for several cases of images of rocks fragments.

The second problem carried out in this research is the rebuilding of **3D size-distribution-curve** starting from the surfaces extracted by image processing. In order to avoid the interference of many skews related to this stage, we recommend to separate the problem into two sub-problems, according to the origin of analysed materials (cut down Heap, truck, belt conveyor) :

- in the case of weak covering and overlapping : an experimental **model of volumic rebuilding** bringing the data of the refusal materials (surface and volumes), and based on the results of reference (screening), is developed. The **two laws of the sizes and the thickness** (laws of rebuilding), which make possible to determine precisely the size and volume of surfaces, are then validated in experiments.
- for the complex case of the appearance of masking between fragments : we commence by putting some **essential assumptions** for the adaptation of the theory of the random structures model into our fragmented rocks case. The analysis of the limitation of a direct application of the random **model of dead leaves** (assumption of the Boolean

diagram) may lead us **to develop a new method of acquisition** based on an incidence with variable of illumination. This new method inspired from the technique "shape-from-shading", makes us possible to obtain an additional information on covering (solid drop shadow between fragments) for the application of **the statistic of the intact grains**.

Finally, the results obtained in this research for the case of the fragments of rocks as well as for other type of images of granular elements, enable us presently to consider a **valorisation** not only for mineral industry but also for other fields such as the agro industry, the pharmaceutical industry and cement factories.

Introduction générale

Dans l'industrie minérale, la quantification de la granulométrie des roches fragmentées est d'un intérêt majeur dans le contrôle de qualité des différentes opérations inscrites dans le processus de production (tir à l'explosif, broyage, concassage, transport,...). L'objectif principal est de maîtriser les paramètres liés à ces opérations, notamment l'énergie explosive, le schéma de tir, les rendements, l'usure,..., et ce, afin de réduire les coûts opératoires et d'améliorer la répartition des tailles obtenues par la fragmentation (réduction des particules fines essentiellement).

La courbe granulométrique des roches fragmentées est généralement mesurée par criblage. Le problème avec ce moyen de mesure est de devoir manipuler une grande quantité du matériau fragmenté (temps d'exécution, nécessité de gros engins et présence d'opérateurs). De plus, le volume mis en jeu reste souvent insuffisant pour pouvoir représenter correctement l'ensemble du tas fragmenté (erreurs d'échantillonnage).

Dans ce contexte et avec le développement des ordinateurs au début des années 90, de nombreuses études ont été menées pour tenter de mesurer la granulométrie des roches fragmentées par analyse d'images. L'objectif est de permettre une mesure automatique, continue et moins coûteuse, tout en s'adaptant aux exigences de la production minière.

Cependant, s'il existe actuellement plusieurs systèmes de mesure de la granulométrie basés sur l'analyse d'images, l'automatisation complète et la robustesse des algorithmes employés n'ont jamais été validées. Notre travail s'inscrit dans la continuité de l'amélioration des démarches suivies par ce genre d'outils et la correction des erreurs inhérentes.

En effet, en tant que technique en plein essor, la granulométrie par analyse d'images connaît d'énormes insuffisances qui se situent principalement au niveau de la **mesure** et de son **interprétation**.

- Le plus souvent et à cause des conditions d'acquisition et du bruit présent dans les images traitées (textures, éclairage non-uniforme sur l'ensemble de l'image), l'information obtenue sur les surfaces des fragments est erronée (sur-segmentation et fusion des fragments et des régions de particules fines, surface des fragments pas accessible entièrement à cause du masquage entre fragments) (Fig. 1).

Le premier objectif de ce travail consistera donc à améliorer l'**extraction complète** des contours des fragments (surfaces (2D)), étape que nous qualifions comme la plus déterminante dans la séquence de mesure. Dans ce sens, une importance particulière a été accordée au filtrage du bruit. De nouveaux outils morphologiques ont été ainsi adaptés à la structure topographique particulière des images à niveaux de gris des fragments de roches (opérateurs résiduels numériques...). Les tests de traitement d'images, effectués sur plusieurs

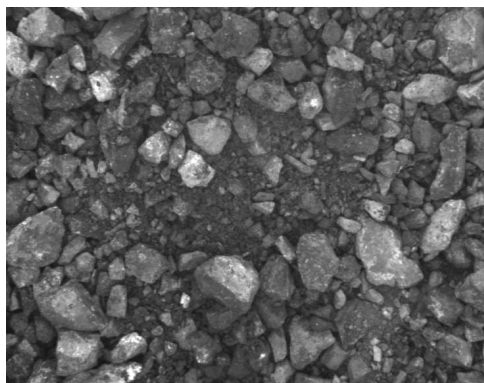


Fig. 1: Image de fragments de roches avec problèmes de bruit

images correspondant à des conditions d'acquisitions et des types de bruits différents, ont fourni des résultats très satisfaisants (Fig. 2).

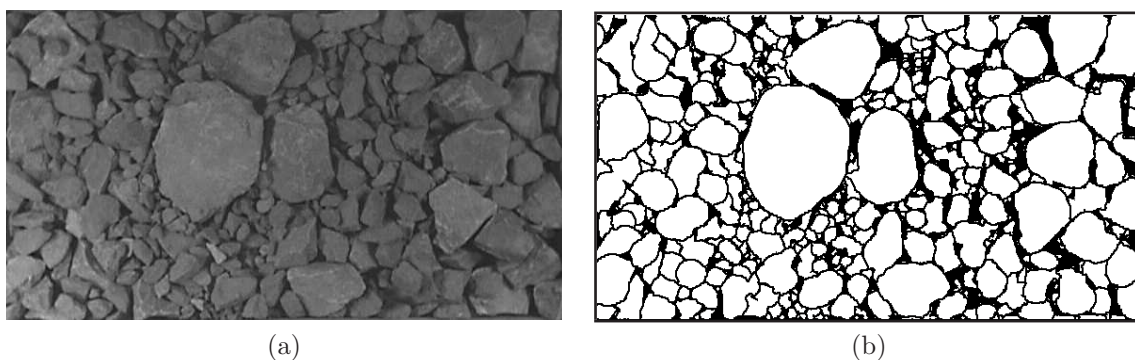


Fig. 2: (a) Image initiale de fragments de roches, (b) Extraction des surfaces des fragments

- Par ailleurs, lorsque la mesure des surfaces extraites des images est considérée comme correcte, son interprétation reste tributaire du fait de devoir valider sa pertinence sur la base de **calibrage** avec des mesures établies par criblage, ou plus précisément par tamisage, ce dernier étant considéré comme la **référence actuelle** de la mesure.

Les difficultés majeures rencontrées à ce niveau concernent la stéréologie (calcul des volumes et des tailles à partir des surfaces extraites et prise en compte du masquage entre fragments) et les différences de concepts entre les deux techniques de mesures (critères de mesure, ségrégation, échantillonnage, ...).

Notre deuxième objectif se limitera à l'amélioration de l'étape **stéréologique** (passage du 2D au 3D). Nous proposons ici une technique simple de reconstruction basée sur l'expérimentation, et qui se distingue par le fait que l'on s'intéresse à la mesure des volumes (et des tailles) et non à la modélisation proprement dite des formes.

En somme, la méthodologie globale de résolution adoptée dans cette recherche et fondée sur l'amélioration de chacune des étapes de la mesure, a pour but d'arriver à une meilleure compréhension des erreurs relatives à chaque étape, et à une meilleure maîtrise des corrections

statistiques finales qui s'imposent pour tout outil de mesure, corrections dues essentiellement aux erreurs d'échantillonnage.

Plan de la thèse

L'étude menée dans ce mémoire est découpée en trois principales parties. L'objet de **la première** est de décrire l'état de l'art de la mesure de la granulométrie telle qu'elle est effectuée par analyse d'images, notamment les méthodologies adoptées par les trois logiciels de mesures les plus cités dans la littérature : Fragscan, Split et Wipfrag. Ensuite, sur la base de l'analyse des erreurs liées à l'analyse d'images et au tamisage, et des différences conceptuelles de ces deux techniques de mesure, nous posons le problème et nous décrivons les étapes auxquelles nous nous sommes intéressés.

La deuxième partie est consacrée à l'étape d'extraction des surfaces des fragments par analyse d'images. Nous commençons par introduire les opérateurs morphologiques de base utilisés tout le long de l'étude. Ensuite, l'évaluation de quelques filtres usuels permettra de toucher aux grandes difficultés rencontrées lors de l'extraction des contours des fragments. A l'aide d'une meilleure prise en compte du relief des images et de nouveaux opérateurs résiduels morphologiques, nous présenterons la nouvelle technique de filtrage qui sera validée par les résultats du détournement complet des fragments.

Les résultats satisfaisants obtenus au niveau de l'extraction des surfaces nous permettent d'aborder convenablement **la troisième partie** qui est composée de trois chapitres (3,4 et 5). Nous débutons par l'étude du cas plus simple où les fragments ne se chevauchent pas et ne se recouvrent pas. L'analyse bibliographique et les limites de la méthode de reconstruction basée sur les passants cumulés montre qu'il est essentiel et plus correct de manipuler des entités matérielles, à savoir les **refus**. Sur la base des histogrammes calculés par analyse d'images et mesurés par tamisage, nous élaborons deux lois de reconstruction : loi des tailles et loi des épaisseurs. Nous présentons ensuite les résultats expérimentaux qui nous ont permis de valider la modélisation du passage en 3D décrite aux chapitres 3 et 4.

Dans le dernier chapitre, nous nous concentrerons sur l'étude du problème du masquage entre les fragments. Nous tenterons de remonter aux caractéristiques des surfaces de fragments subissant du chevauchement et du recouvrement à travers des modèles de structures aléatoires et plus précisément celui des **feuilles mortes**. Le modèle ainsi que les hypothèses posées pour son adaptation à la structure des fragments de roches sont décrits. Les limites de la première méthode issue du modèle, dite "hypothèse du schéma Booléen" sont discutées. Nous étudions ensuite la méthode de la "statistique des grains intacts", issue aussi du modèle et manifestement mieux adaptée aux cas des roches fragmentées. Associée à cette méthode, nous présenterons une nouvelle technique d'acquisition, basée sur une **incidence variable d'éclairement**, permettant l'amélioration de l'extraction des grains intacts de l'image.

Première partie

Présentation du problème

Mesure de la granulométrie des roches fragmentées

*C*e premier chapitre a pour objet d'introduire la mesure de la granulométrie des roches telle qu'elle est effectuée par tamisage et par analyse d'images. Les différences conceptuelles entre les deux techniques de mesure sont étudiées. Les méthodes utilisées par les trois logiciels de traitement d'images, FragScan, Split et WipFrag, sont décrites.

En tant que technique de mesure, en plein essor, l'analyse d'images des roches fragmentées connaît bien des limites. Notre approche adoptée dans cette thèse, basée sur une amélioration de la séquence de traitement étape par étape, a pour objectif d'augmenter la robustesse de la mesure en maîtrisant la nature des corrections statistiques finales.

1.1 Granulométrie par tamisage : référence actuelle de la mesure

Le terme *granulométrie* désigne l'opération qui consiste à décrire, selon un critère donné, la **distribution des tailles** d'un ensemble d'objets.

En ce qui concerne les applications minières, l'estimation de la distribution des tailles par **criblage** s'inscrit dans un objectif global de contrôle de qualité et de réduction du coût de l'exploitation [Napier-Munn *et al.*, 1996, Scott *et al.*, 1996] [50] [67]. Elle répond principalement aux nécessités suivantes :

- l'évaluation du rendement du tir, ce dernier étant caractérisé par les paramètres liés à l'énergie employée et par le schéma utilisé,
- la régulation du concassage et du broyage,
- l'évaluation du rendement de ces deux opérations.

En fonction de la taille des fragments manipulés et des moyens mis en oeuvre pour la mesure de la granulométrie, le criblage peut se diviser en trois principales opérations :

- le **tamissage** de granulats, qui consiste à faire passer les fragments de roche dans des tamis de plus en plus fins et opérer une mesure sur le contenu de chacun d’eux, est limité à des tailles d’environ 125 *mm*,
- l’étude des “enrochements”, où l’on utilise des tables de criblage dont la taille des mailles varie entre 100 et 200 *mm*,
- la “blocométrie”, où il s’agit de modèles volumiques pour la mesure des tailles (tel que celui des cubes). Les fragments mis en jeu sont de taille supérieure à 200 *mm*.

L’opération sur laquelle portera notre intérêt au cours de cette étude, et qui est la seule à être normalisée (AFNOR), est notamment le tamissage. Il est aussi l’un des moyens simples à mettre en œuvre et le plus utilisé pour établir la distribution des tailles des roches fragmentées.

1.1.1 Taille et calcul des proportions granulométriques par tamissage

La mesure de la distribution des tailles des roches peut se faire en **masse** ou en **nombre**. Pour le cas des roches abattues, l’intérêt est porté essentiellement sur l’analyse granulométrique en masse.

De façon générale, il s’agit de peser l’ensemble des grains retenus dans chaque tamis, donnant lieu à différentes proportions. Ces dernières sont triées, suivant des classes, selon un concept de taille bien précis. En ce qui concerne le tamissage, la taille des fragments est prise comme étant le côté du plus grand tamis pouvant les contenir. En terme de classe, cette taille correspond à la plus petite maille des deux tamis qui représentent la classe.

Étant donné un ensemble de n tamis, la proportion de masse (ou passant cumulé) P_i équivalente au tamis i est donnée par :

$$P_i = 100 \left(1 - \frac{\sum_{k=i}^n R_k}{R_T} \right) [\%] \quad (1.1)$$

où R_k est le refus équivalent au tamis k et R_T le refus total (masse totale tamisée).

La représentation graphique de ces proportions cumulées donne la courbe granulométrique (Fig. 1.1).

1.1.2 Problèmes rencontrés lors de la mesure de la distribution des tailles des grains

Bien qu’encore largement utilisée, cette méthode de tri s’accompagne de nombreux inconvénients lorsqu’il s’agit d’une application minière. Ils se résument comme suit :

- le premier problème est celui de la **représentativité** de l’échantillon mesuré. Plus précisément, sa capacité à décrire la distribution granulométrique de l’ensemble du tas étudié. Afin d’éviter au maximum les problèmes d’échantillonnage, il est généralement essentiel de manipuler un volume important de fragments. De plus, à partir d’une certaine taille,

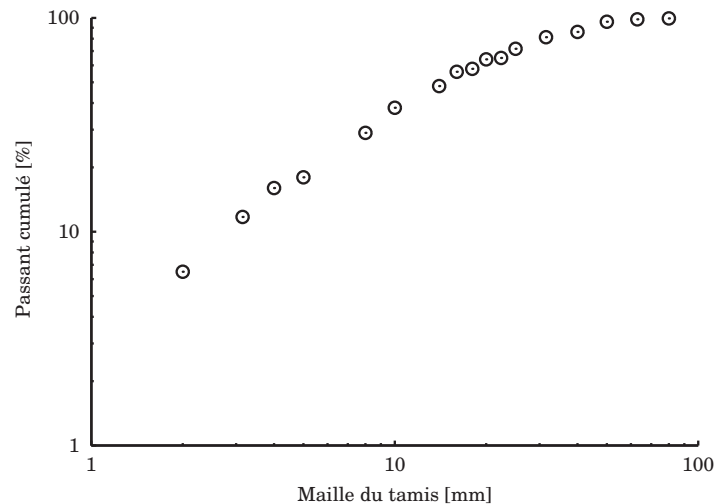


Fig. 1.1: Courbe granulométrique expérimentale par tamisage

le tamisage devient problématique. Dans ce cas, comme évoqué auparavant, on parle plutôt de mesure d'enrochements et de blocométrie. L'idée proposée par quelques auteurs consiste à déterminer une masse minimale à prélever pour chaque taille des fragments de la distribution (Smith *et al.*, 1993) [71].

- Le **temps de réalisation** de la mesure, qui dépend du volume manipulé mais aussi des tailles existantes (nécessité de gros engins pour trier les gros blocs), sera d'autant plus grand que le volume de l'échantillon sera important.
- Ceci interfère nécessairement avec l'opération de production lorsqu'il s'agit de connaître la distribution des tailles qui résulte du tir pour pouvoir réguler correctement le broyage et le concassage.

Malgré les problèmes cités, le tamisage reste la **référence** actuelle de la mesure de la distribution granulométrique des roches fragmentées.

Ainsi, la pertinence de la mesure par analyse d'images (section 1.2) sera validée sur la base des résultats de ce dernier.

1.2 Granulométrie des roches par analyse d'images

En tant que substitution du tamisage, la mesure de la granulométrie des roches par analyse d'image permet de réduire considérablement les problèmes liés au tamisage précédemment cités. Les justifications principales du choix de cette technique de mesure sont :

- la réduction des coûts opératoires ;
- le contrôle continu de la fragmentation sans interférence avec la production ;
- et un gain de temps d'exécution.

1.2.1 Concept de taille pour l'analyse d'images

Le traitement d'images tente de simuler un tamisage physique en affectant à chaque surface de fragment, extraite de l'image, une taille et un volume. Comme pour le cas du tamisage, l'affectation d'une taille aux surfaces des fragments détectés par analyse d'image doit s'effectuer selon un concept de taille précis.

La technique étant en plein essor, les études menées par différents auteurs sur ce problème, montrent que jusqu'à présent le concept de taille n'est pas unique (Allen, 1968, Stockham, 1977, Murphy, 1984, Kennedy *et al.*, Matthews, 1991, Bedair *et al.*, 1996) [31][49] [74] [73] [2].

L'utilisation des différentes tailles définies par les auteurs pour l'analyse du même échantillon fournit des distributions de tailles complètement distinctes (W.X. Wang, 1996) [77]. Parmi les tailles les plus utilisées, il existe la taille déterminée par la méthode de la ficelle, le diamètre de Férét et le diamètre du cercle équivalent.

1.2.1.1 Taille déterminée par la méthode de la ficelle

La plus ancienne méthode d'attribution de taille aux fragments, appliquée aussi au cas du traitement d'images, consiste à effectuer un balayage de l'image binaire avec un segment gradué suivant une direction donnée. Le diamètre attribué à une particule (appelé aussi diamètre de Martin) n'est autre que la plus grande mesure des ficelles formées sur la particule (Fig. 1.2).

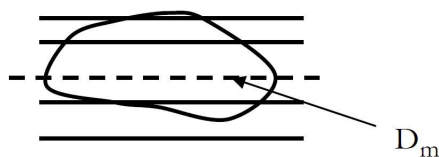


Fig. 1.2: Taille d'un fragment par la méthode de la ficelle

Cette méthode est largement utilisée du fait de sa rapidité et la simplicité de sa mise en œuvre (L. Nyberg, O. Carlsoon et B. Schmidtbauer ,1982) [52]. Toutefois, cette attribution de taille présente l'inconvénient d'être dépendante de la direction de balayage.

1.2.1.2 Diamètre de Férét

Le diamètre de Férét, proposé par L.R. Férét en 1931 [36], correspond à la distance entre les deux plans parallèles encadrant le contour du fragment suivant une direction donnée.

La taille affectée à la particule dépend aussi de la direction choisie, et seuls deux diamètres sont particuliers, à savoir le diamètre minimal (mésodiamètre) (Fig. 1.3) et le diamètre maximal (Exodiamètre). Le plus utilisé étant ce dernier.

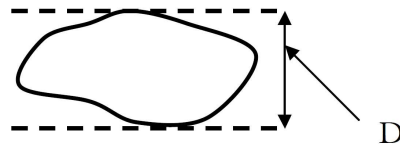


Fig. 1.3: Diamètre de Férét minimal

1.2.1.3 Diamètre du cercle équivalent

La méthode du diamètre du cercle équivalent a été aussi très utilisée par différents auteurs (N.H. Maerz, J.A. Franklin, L. Rothenburg, et D.L. Coursen, 1987) [16]. Le terme «cercle équivalent», proposé par Heywood en 1947 [23] [36], peut correspondre à deux définitions différentes :

- cercle ayant la même surface que la particule ;
- ou cercle ayant le même périmètre que la particule.

Du point de vue de l'analyse d'images, il est plus facile de calculer la surface du fragment que son périmètre. Par conséquent, la taille du fragment est souvent prise comme étant le diamètre du cercle de même surface. (Fig. 1.4).

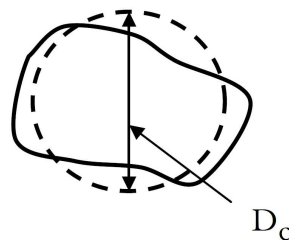


Fig. 1.4: Diamètre du cercle équivalent de même surface

Contrairement à la première taille, les deux dernières présentent l'avantage d'être invariables par rotation.

Dans cette section nous nous sommes contentés de décrire les différentes tentatives d'attribution des tailles aux fragments par analyse d'images. La discussion de la pertinence de ces choix ainsi que le concept de taille proposé et adopté dans cette étude feront l'objet du chapitre 4.

De même, le chapitre 3 fera l'objet d'une description détaillée des méthodes d'attribution des **volumes**, aux surfaces détectées par analyse d'images, les plus utilisées dans la littérature.

1.2.2 Étapes de mesure par analyse d'image

D'une manière générale, la séquence de mesure de la fragmentation par analyse d'images peut être résumée par le diagramme suivant :

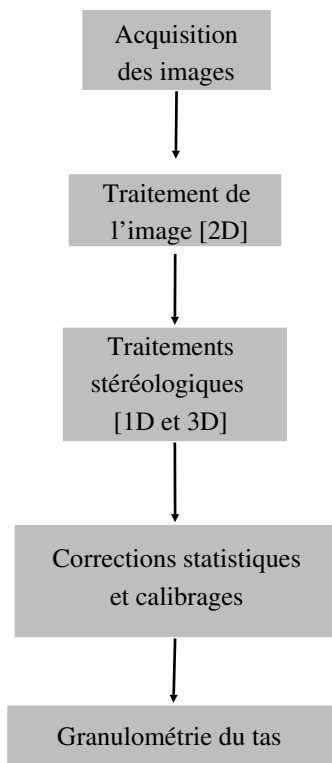


Fig. 1.5: Étape de mesure de la distribution des tailles par analyse d'images

Actuellement, l'acquisition des images se fait en automatique moyennant les caméras numériques. L'étape des traitements $2D$, appliqués aux images à niveaux de gris, consiste à effectuer les opérations suivantes :

- en tout premier lieu, il s'agit d'éliminer les images incorrectes, notamment les images vides et celles caractérisées par un bruit atypique tel que : les poussières regroupées sur l'objectif de la caméra, les images floues à cause de la vibration ou le mauvais réglage du déclenchement de l'acquisition,
- ensuite des filtrages sont opérés sur les images afin de réduire au maximum les bruits qui les entachent,
- en dernier lieu, les algorithmes de séparation des fragments sont utilisés pour extraire les contours de ces derniers. Le résultat est une image binaire représentant les fragments et les zones d'ombre.

Les traitements stéréologiques, opérés sur l'image binaire, consistent à trier les fragments selon des classes (critère de taille) puis à affecter à chacun d'eux un volume.

Les corrections statistiques ont pour but de prendre en compte l'insuffisance de la technique de mesure à accéder entièrement à l'information recherchée. Elles tentent ainsi d'estimer l'information sous-jacente due au **recouvrement**, au **chevauchement** et à la **ségrégation** des fragments.

Basés sur la comparaison avec le tamisage, des calibrages sont utilisés pour corriger toutes les erreurs inhérentes aux différentes étapes précédentes.

Le résultat final de l'ensemble de ces étapes est la courbe granulométrique expérimentale par analyse d'images du tas étudié.

1.2.3 Modèles mathématiques d'ajustement

Pour des raisons pratiques, il est utile d'ajuster les données expérimentales de mesure de la granulométrie à une fonction analytique. Il s'agira alors de ne manipuler que quelques paramètres, généralement deux, et il sera donc plus facile de faire des calculs avec cette fonction que sur les données expérimentales (passant cumulé à une taille donnée qui diffère des mailles des tamis utilisés par exemple).

Différents modèles sont utilisés pour l'ajustement des distributions granulométriques (Allen, 1981, Bergstrom, 1966, Haris, 1968, Beke, 1964, Peleg *et al.* 1986, Yu *et al.*, 1990, F. Ouchterlony, 2005) [59] [1] [55]. Les deux modèles les plus connus, et largement employés pour le cas des données granulométriques issues de l'analyse d'images, sont ceux de Gates-Gaudin-Schuhmann et de Rosin-Rammler-Bennet.

Kemeny *et al.* (1999) [30] ont employé ces deux modèles lors de leur tentative d'amélioration de la description de la partie fine de la courbe granulométrique. Maerz *et al.* (1996)[40] utilisent, pour leur part, le modèle de Rosin-Rammler comme ajustement des données fournies par le logiciel de traitement d'images WipFrag (section 1.2.4).

Il est toutefois important de noter que les modèles de distributions doivent être considérés comme des lois empiriques car ils ne sont pas le fruit de modélisations des processus physiques ayant produit la fragmentation étudiée.

En effet, la forme de la courbe granulométrique expérimentale ressemble généralement à celle d'une fonction de répartition d'une variable aléatoire. Raison pour laquelle elle est remplacée par une loi empirique associée à des fonctions classiques de variables aléatoires éventuellement modifiées (distributions uniformes, gaussiennes...).

1.2.3.1 Modèle de Rosin-Rammler

Le modèle de Rosin-Rammler, connu aussi sous le nom de distribution de Weibull [58], sera utilisé lors de cette étude. La fonction a été introduite lors des études du broyage et du concassage du charbon en 1933 [1]. Elle exprime le passant cumulé en masse (ou en volume) par :

$$P(x) = 100 \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{X_c} \right)^n \right] \right) [\%] \quad (1.2)$$

- où X_c est la *taille caractéristique* de la distribution, elle correspond à un passant cumulé $P = 100 (1 - e^{-1}) [\%]$ (63, 21[%]) ;
- et n est le coefficient d'*uniformité* (ou indice de forme de la courbe), il fournit une mesure de la raideur de la courbe cumulée (diffusion de la distribution). Plus la valeur de n est grande plus la distribution est uniforme (caractérisée par un nombre réduit de classes) (Fig. 1.6).

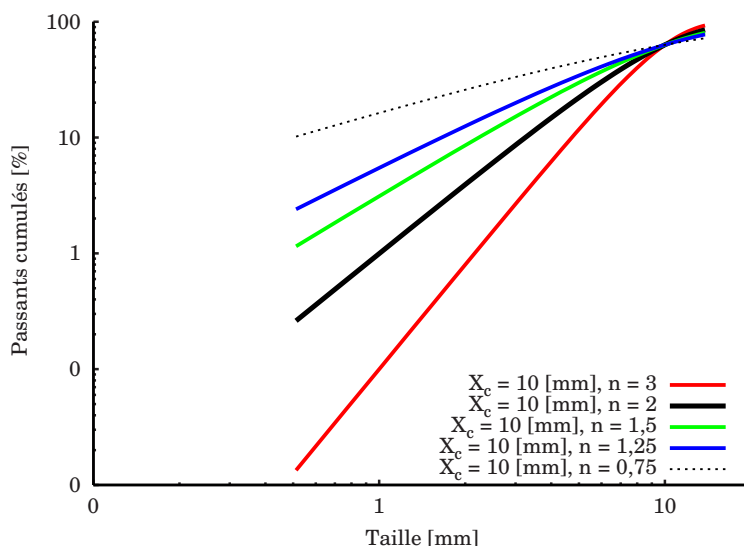


Fig. 1.6: Différentes valeurs du paramètre d'uniformité n pour le modèle de Rosin-Rammler

1.2.3.2 Calcul des paramètres du modèle de Rosin-Rammler à partir des données expérimentales

(1.2) implique :

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - P(x)} \right) \right] = n \ln(x) + \ln \left(\frac{\ln(e)}{X_c^n} \right) \quad (1.3)$$

(1.3) implique :

$$Y = nX + Cte \quad (1.4)$$

avec :

$$X = \ln(x) \quad (1.5)$$

$$Y = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - P(x)} \right) \right] \quad (1.6)$$

Le calcul des deux paramètres X_c et n du modèle se fera donc de façon à ajuster la courbe expérimentale des passants, tracée en échelle logarithmique, à la droite d'équation $Y = nX + Cte$. La régression utilisée étant celle des moindres carrés.

Les valeurs de n et Cte sont données par :

$$n = \frac{k \sum_i X_i Y_i - \sum_i X_i \sum_i Y_i}{k \sum_i X_i^2 - \left(\sum_i X_i \right)^2} \quad (1.7)$$

$$Cte = \frac{k \sum_i X_i^2 \sum_i Y_i - \sum_i X_i \sum_i X_i Y_i}{k \sum_i X_i^2 - \left(\sum_i X_i \right)^2} \quad (1.8)$$

où X_i et Y_i sont les données granulométriques expérimentales de la courbe granulométrique tracée en échelle logarithmique. k étant le nombre total des classes de tailles mises en jeu.

Enfin le paramètre X_c est calculé moyennant la formule suivante :

$$X_c = \left(10^{-Cte} \ln(e) \right)^{1/n} \quad (1.9)$$

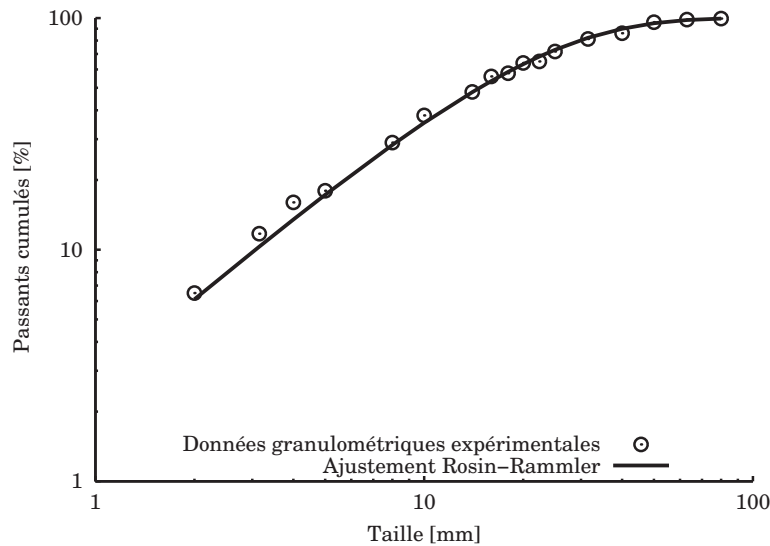


Fig. 1.7: Ajustement du modèle de Rosin-Rammler aux données expérimentales

1.2.4 État de l'art de la mesure par analyse d'images

1.2.4.1 Logiciels de traitements

Avec l'évolution des techniques d'acquisition et des traitements relatifs aux mesures des fragments par analyse d'images, de nombreux logiciels d'analyse d'images dédiés à la granulométrie des roches ont vu le jour (CIAS^(R) [14], GoldSize [32], IPACS [13], TUCIPS [22], etc...). Nous

nous proposons de décrire l'état de l'art des trois logiciels les plus connus dans la littérature, à savoir : FragScan [64], Split [18] et WipFrag [40] [35].

L'objectif de cette section est d'introduire brièvement et de façon générale :

- les étapes de mesure ;
- les méthodes utilisées pour chacune des étapes ;
- les résultats obtenus ;
- et les limites des trois logiciels.

Les opérateurs employés par les logiciels, relatifs aux méthodes de traitements surfaciques (2D), et des calculs stéréologiques (1D et 3D) sont décrits en détails dans les parties II et III.

a. FragScan

Le logiciel FragScan (Chavez, 1991, 1996, Schleifer *et al.*, 1996) [64] [8] [63] [7] [65], développé à l'*École des mines de Paris* et commercialisé par Armines, a été conçu initialement pour estimer la distribution des tailles de l'ensemble du tas juste après le tir.

L'acquisition se fait en automatique. Initialement, les images ont été acquises au niveau des engins de transport (Dumpers par exemple). Actuellement, les images sont prises sur les convoyeurs à bandes, et sur les entrées (ou sorties) des concasseurs ou des stations de chargement. Pour les cas où le matériau se déplace, le déclenchement de la caméra est synchronisé avec la vitesse de déplacement des fragments.

A cause de la présence du bruit dans les images initiales, les traitements 2D fournissent des images binaires dont la reconnaissance des contours des fragments n'est que partielle. Elle constitue en effet, le résultat d'un pré-filtrage par homogénéisation locale suivie d'un seuillage automatique par maximisation de la variance interclasses (Fig. 1.8-b).

En fonction du nombre de tamis choisis, le système simule ensuite l'opération du tamisage moyennant des opérateurs morphologiques appliqués à l'image résultante (ouvertures successives croissantes). Le tri effectué permet de distribuer l'ensemble des surfaces selon des classes de tailles.

L'étape stéréologique consiste à attribuer des tailles et remonter aux volumes de chaque classe en se basant sur un modèle de passage appelé *modèle des sphères* (section 3.3).

b. Split

Split a été développé à l'*University of Arisona* au début des années 90 (Kemeny *et al.* 1996) [18]. Les traitements sont automatiques lorsque les images sont acquises sur le convoyeur à bandes. L'analyse en 2D, utilisant la segmentation par l'algorithme de la ligne de partage des eaux (Beucher [3] et Lantuéjoul [34] ; section 2.3), donne pour la plupart du temps des fragments divisés ou fusionnés (Fig. 1.9).

Des critères géométriques basés sur la fonction distance, et qui prennent en compte la taille et la forme des fragments, sont ensuite utilisés pour réduire ces problèmes. Enfin, les traitements 2D sont complétés par un détournage manuel des fragments.

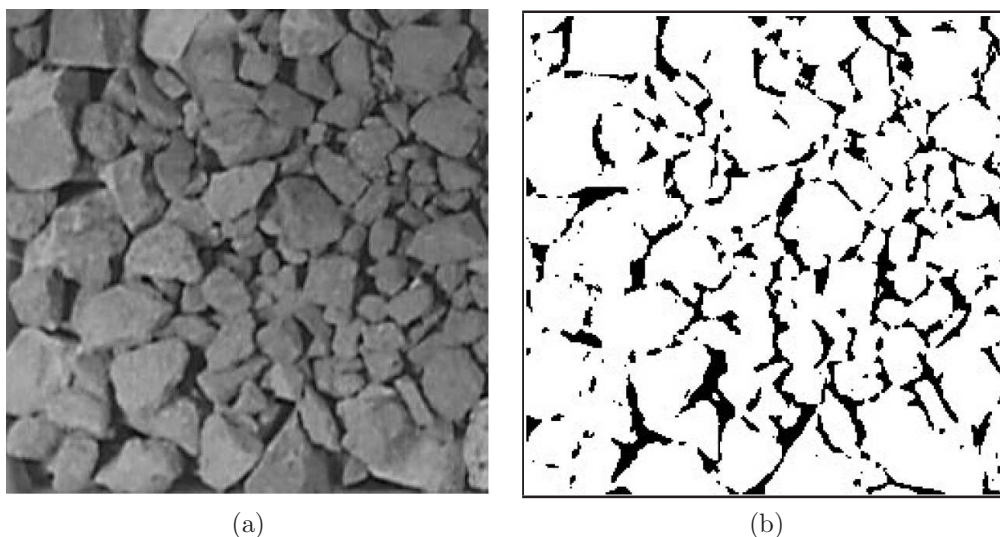


Fig. 1.8: (a) Images initiale, (b) Résultat des traitements $2D$ pour le cas de FragScan : seuillage par maximisation de la variance interclasses après homogénéisation locale

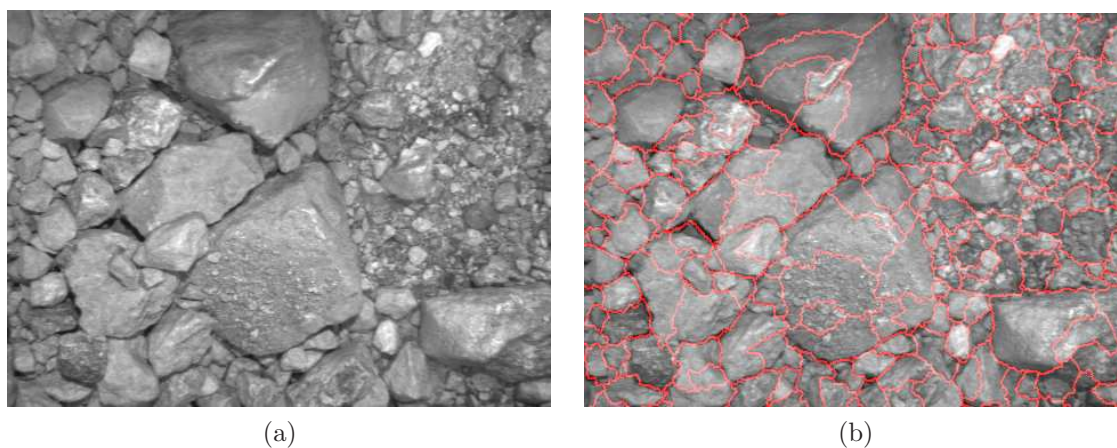


Fig. 1.9: (a) Images initiale, (b) Problèmes d'extraction des contours : fusion des régions de fines et sur-segmentation des fragments

Concernant le passage en $3D$, les auteurs se basent sur des corrélations de l'analyse d'images de différentes formes de fragments avec les résultats du tamisage. Ils choisissent les axes de l'ellipse ayant la même surface visible des fragments pour le calcul des tailles et des volumes (section 3.1).

Avant calcul des proportions granulométriques, les auteurs opèrent une correction dite de fines. Ils procèdent en attribuant un pourcentage des zones d'ombres de l'image binaire (zones noires) aux particules fines qu'ils ajoutent à l'ensemble de la distribution des tailles (section 1.2.4.2).

c. WipFrag

Les étapes de traitements suivies par le logiciel WipFrag, développé à l'Université de Waterloo au Canada (Maerz *et al.*, 1987) [56] [57], sont les suivantes :

- de la même manière que FragScan, l'acquisition se fait en automatique à différents niveaux de la chaîne de production.
- Les traitements *2D* tentent en premier lieu de détecter partiellement les contours puis opèrent des techniques basées sur des critères de voisinage pour la reconnaissance des contours complets. Ensuite les auteurs proposent le recours aux corrections manuelles pour corriger les mêmes erreurs de détournage décrites pour le cas du logiciel Split (erreurs de sur-segmentation et de fusion ; Fig. 1.9).
- La reconstruction de la courbe granulométrique en *3D* utilise les principes de la probabilité géométrique [Santalo, 1976] [61] [Maerz *et al.*, 1996] [38] (section 3.2).
- Enfin, un calibrage empirique prenant en compte les particules fines non détectées est effectué. La démarche suppose que la granulométrie analysée suit le modèle de Rosin-Rammler dont le coefficient d'uniformité n est déterminé grâce à des tamisages préalables. Selon les auteurs, cette démarche est aussi complétée par la combinaison de résultats d'images prises sous différentes résolutions (technique appelée "zoom-merging", Santamarina *et al.*, 1996 [62]).

1.2.4.2 Erreurs de mesure liées à l'analyse d'images

Pour pouvoir comprendre les insuffisances que connaissent les outils de mesure, il faut s'intéresser aux différentes sources d'erreurs qui affectent l'authenticité de la mesure finale. Elles se manifestent par des décalages entre les courbes granulométriques fournies par les outils de mesures et les courbes de référence déterminées par tamisage.

De façon générale, les problèmes rencontrés par les différents logiciels peuvent être regroupés en deux principaux types : ceux liés à la nature de la mesure elle-même (a et b) et ceux liés à la méthode de traitement intrinsèque à chaque logiciel (c).

a. Erreurs dues à l'échantillonnage

Généralement, les erreurs d'échantillonnage apparaissent lorsqu'il s'agit de caractériser une large distribution à partir d'un nombre réduit d'échantillons.

Pour le cas du traitement d'images, la majorité des études menées sur le sujet tentent d'adapter les résultats de la théorie d'échantillonnage des minerais en vrac développée par P.Gy (1967) [20] [21] [19] à la mesure de la granulométrie par analyse d'images. On constate principalement que :

- le caractère aléatoire des prélèvements, qui détermine un échantillonnage correct au sens de P.Gy, n'est pas respecté dans le cas où les images sont acquises sur un endroit fixe (camions et tas) ;
- les parties recouvertes de la granulométrie acquise sur le tas et les camions ne peuvent être accessibles à l'acquisition. Les images disponibles ne concernent, en effet, que les fragments situés sur la couche supérieure. Ce problème, dit de **recouvrement** et de **ségrégation**,

est d'autant plus conséquent que la granulométrie est étalée (faible valeur de n pour une distribution qui suit le modèle de Rosin-Rammler).

Les tentatives menées par les auteurs pour remédier à ces insuffisances s'effectuent en opérant des corrections à deux niveaux :

- en amont, des améliorations au niveau de l'acquisition sont apportées en augmentant les endroits de prise et le nombre des échantillons prélevés (stratégie de la prise de mesure).
- En aval, des pondérations statistiques basés essentiellement sur la comparaison avec les résultats de tamisages préalables de la fragmentation étudiée, sont utilisées (Chavez, 1996) [8] [9].

Nous reviendrons en détail sur les méthodes de corrections utilisées par les auteurs des trois logiciels dans le chapitre 3.

b. Problèmes dus à la présence de particules fines

L'un des problèmes majeurs rencontrés lors du traitement d'images des fragments de roches est celui des particules fines. Ces dernières sont définies en termes d'analyse d'images comme étant les particules très petites non visibles à l'image à cause de la ségrégation ou à cause de leur trop petite taille comparée à la résolution employée lors de l'acquisition.

Lorsque ces particules sont regroupées, les régions équivalentes sont fusionnées lors des traitements surfaciques (problème de **fusion**). Détectées ainsi comme de grandes particules, leur proportion est généralement sous-estimée par analyse d'images.

Malgré la bonne compréhension du problème, on trouve peu d'études concluantes sur la correction des erreurs dues aux fines. La plupart des auteurs procèdent par calibrage des mesures obtenues moyennant des calages aux modèles mathématiques précédemment cités.

- Maerz *et al.* (1999) [42] supposent que les erreurs dues aux fines sont en général systématiques. Ils déduisent qu'en conséquence, l'uniformité n de la distribution ne change pas pour une phase donnée de la chaîne de production (tir, concassage ou broyage). Ils procèdent ensuite par calage d'une courbe modifiée de Rosin-Rammler à toute la distribution.

Les deux paramètres du modèle $X_{cWipFrag}$ et $n_{WipFrag}$ déterminés par WipFrag sont comparés aux résultats obtenus par tamisage des mêmes échantillons étudiés, puis les nouveaux paramètres qui servent au calage du modèle à la distribution sont corrigés comme suit :

$$X_c = c1 \times X_{cWipFrag} \quad (1.10)$$

$$n_c = c2 \times n_{WipFrag} \quad (1.11)$$

où $c1$ et $c2$ sont des coefficients reliant les paramètres du traitement d'image à ceux du tamisage.

Une analyse assez détaillée a été menée par les auteurs pour renforcer l'hypothèse des erreurs systématiques [42]. Lorsque le coefficient d'uniformité n est inférieur à 0,75, les calibrages ne donnent pas de bons résultats.

Pour pallier cette restriction, les auteurs utilisent aussi la technique du "zoom-merging" qui consiste, comme décrit précédemment, à relier les données obtenues à partir d'images prises

sous différentes résolutions. Pour le cas des fines en deçà de la résolution des caméra, cette méthode semble fournir des résultats assez proches des distributions des tailles mesurées par tamisages.

Elle reste toutefois encombrante et ne peut s'adapter aux objectifs d'automatisation de la mesure. En effet, de telles résolutions nécessitent une présence permanente d'un opérateur. Il aura pour rôle le réglage de la caméra en fonction de la taille des plus petites particules des régions susceptibles d'être en dessous de la résolution utilisée.

- Kemeny *et al.* (1999) [30] utilisent de leur côté le modèle mathématique de Gaudin-Schuhman (GGS) pour le calibrage de la distribution granulométrique particulièrement au niveau des fines.

En se basant sur l'histogramme des volumes calculés par analyse d'image, les auteurs définissent une taille "fines cutoff", notée F_c , au-dessous de laquelle toute particule est considérée comme fine. La détermination de la valeur de F_c dépend de la forme de l'histogramme :

- lorsque l'histogramme est unimodal, $F_c = \frac{3}{4} \times \text{mode}$ (Fig. 1.10-a),
- lorsque l'histogramme est plurimodal, $F_c = 1^{er} \text{ mode}$ (Fig. 1.10-b).

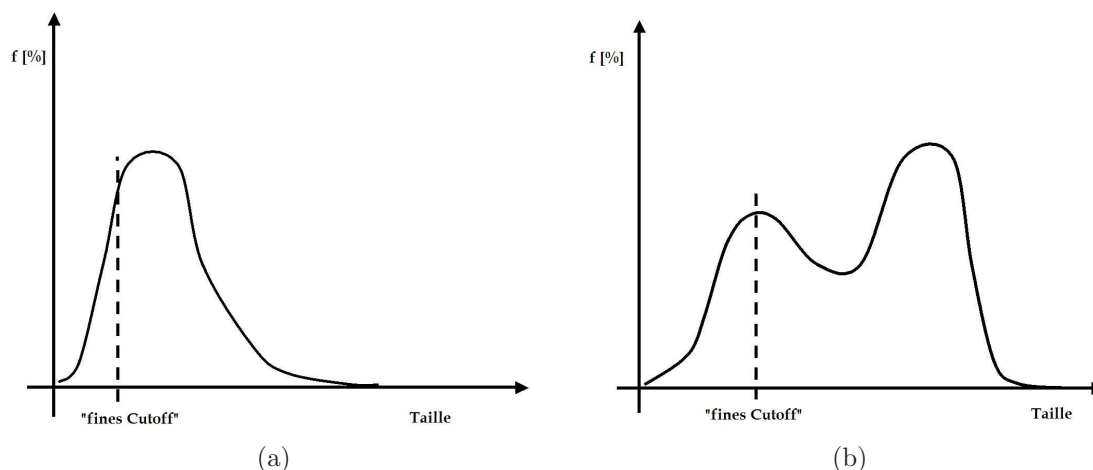


Fig. 1.10: (a) Histogramme unimodal, (b) Histogramme avec deux modes

Ensuite, afin de déterminer un intervalle de tailles pour les fines, la taille minimale de la distribution et la quantité totale des fines sont estimées en se référant à des tamisages des mêmes échantillons traités par images.

Enfin, le modèle de Gaudin-Schaumann, décrivant cet intervalle, est utilisé pour prolonger la courbe initiale au niveau des petites tailles (Fig. 1.11).

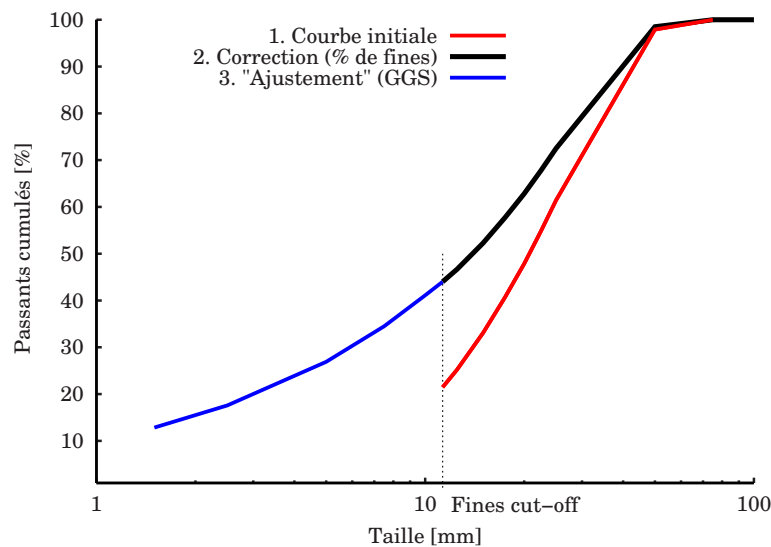


Fig. 1.11: Correction des fines - méthode de Split

Les études de validation, menées par les auteurs, semblent montrer que la méthode donne des résultats assez proches de la référence. Cependant, les auteurs ne sont pas explicites quant à une éventuelle généralisation du choix de la valeur “fines-cutoff” à différents sites.

c. Erreurs dues à la technique employée pour l'extraction de l'information 2D

La mauvaise extraction des contours se manifeste principalement par :

- la fusion et la sur-segmentation des fragments (cas de Split et de WipFrag),
- la reconnaissance partielle des contours des fragments et les problèmes de détection des fines (cas de FragScan).

Les calculs des tailles et des volumes sont affectés par ces problèmes 2D, ce qui induit des proportions granulométriques surestimées (ou sous-estimées) comparées aux proportions de référence. La principale cause des problèmes d'extraction des surfaces est le bruit présent dans les images. Ce dernier est dû essentiellement aux conditions d'acquisition :

- notamment l'éclairage des images, dans la plupart des cas naturel, donne des images caractérisées par un contraste variable entre ses différentes régions ;
- la texture des fragments change non seulement d'une image à l'autre mais aussi d'un fragment à l'autre,
- Enfin, en deçà d'une certaine taille, la résolution de la caméra ne permet plus de distinguer correctement les fragments.

1.3 Différences conceptuelles entre les deux techniques de mesure

Afin de remédier correctement aux problèmes relatifs à la mesure par analyse d'images, nous devons nous arrêter aussi sur la compréhension des différences conceptuelles entre cette technique de mesure et le tamisage.

D'après les analyses précédentes et les différentes études menées sur la comparaison de la courbe granulométrique par tamisage avec celle établie par analyse d'images (Chavez *et al.*, 1996, Hunter *et al.*, 1990, Maerz *et al.*, 1987, Rholl *et al.*, 1993, Wang *et al.*, 1996, Yen *et al.*, 1994.) [8] [24] [39] [60] [78] [79], les différences conceptuelles peuvent être regroupées comme suit :

- la **taille** attribuée au fragment n'est pas la même pour les deux techniques. En effet, pour le tamisage on s'intéresse à la notion de refus pour attribuer la maille du tamis comme taille. Alors qu'en analyse d'image, on s'intéresse particulièrement à la surface du fragment à laquelle on tente d'attribuer une taille donnée sur la base de considérations de forme et de calibrages avec le tamisage.
- De même, par tamisage, la prise en compte de la masse volumique de la roche permet de calculer les **volumes** à partir des masses retenues dans chaque tamis. Pour le cas de l'analyse d'images, la modélisation volumique consiste à attribuer, sur la base de considération de forme, à chaque surface individuelle de fragment une troisième dimension inaccessible à l'acquisition. Ceci s'avère problématique à cause de la forme très variable des fragments étudiés. Le calcul des volumes (comme l'attribution des tailles) est étudié en détails dans la section 4.
- La prise de **l'échantillon** pour le cas de l'analyse d'images correspond à la prise d'images et ne concerne que les couches supérieures de la granulométrie étudiée. En effet, à cause du recouvrement et de la ségrégation des fragments, une partie de la granulométrie reste inaccessible à l'acquisition. Alors que cette dernière est prise en compte lors du calcul de la courbe granulométrique de référence par tamisage.

1.4 Démarche générale adoptée et problèmes étudiés

1.4.1 Position du problème

Il ressort des sections précédentes que, pour corriger les différentes erreurs rencontrées par les outils de mesure, nous avons à trancher entre deux principales démarches de résolution. A savoir, corriger les résultats finaux en procédant à des calibrages directs avec les résultats équivalents du tamisage (méthode la plus souvent utilisée). Ou analyser la séquence de mesure et tenter d'optimiser étape par étape la résolution globale.

La première démarche malgré le fait qu'elle soit rapide et qu'elle donne des résultats ponctuels satisfaisants (moyennant des calibrages), s'est montrée instable et peu robuste sur le long terme par rapport à d'éventuels changements des conditions de prise de la mesure, dus notamment à :

- l'éclairement,
- la nature de la roche,

- la méthode d'échantillonnage,
- le changement de site. . .

De plus, le caractère erratique des erreurs relatives à quelques étapes de mesure (l'extraction des surfaces notamment) fait que les corrections finales effectuées ne renseignent pas précisément sur quels biais elles portent.

Dans la perspective de l'amélioration du logiciel de mesure FragScan, la seconde méthode, qui sera suivie dans ce travail, est plus longue en terme de temps de résolution certes mais s'avèrerait plus robuste puisqu'elle permet de connaître les différentes erreurs corrigées.

Avec ce choix de démarche de résolution, la position adoptée du problème peut être schématisée comme suit :

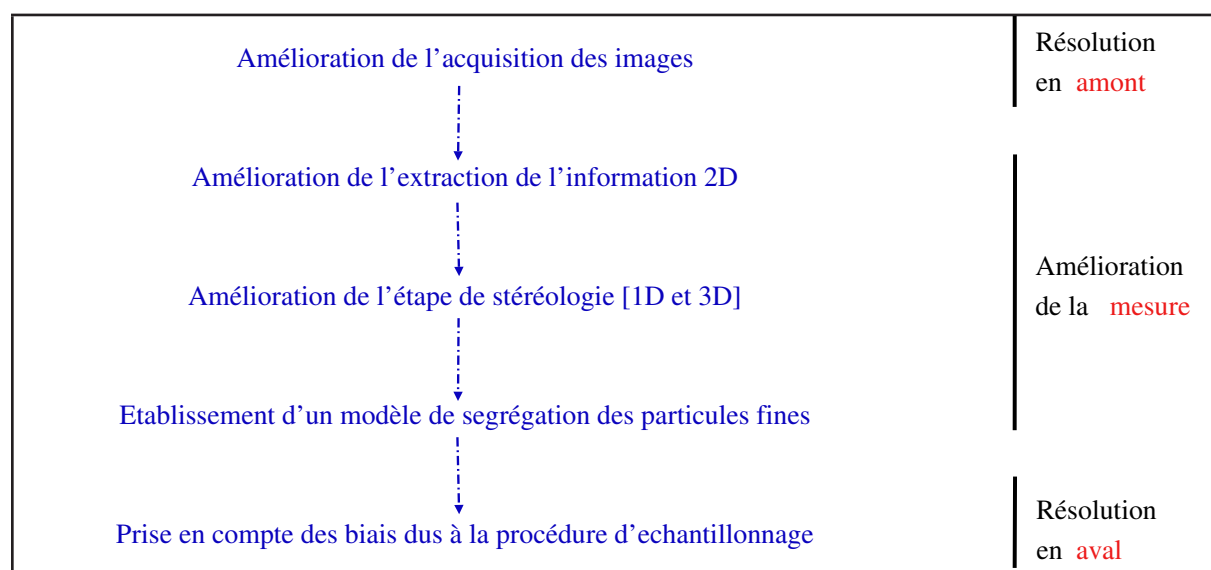


Fig. 1.12: Organigramme général de résolution

- en amont, en ce qui concerne l'**amélioration de l'acquisition des images**, l'objectif est d'éviter au maximum le bruit qui les affecte, et améliorer la représentativité de l'échantillon mesuré. Pour ce faire, nous devons nous assurer des deux points suivants :
 - que l'éclairage est bien maîtrisé de façon à ce qu'il soit homogène sur l'ensemble des régions de l'image. Et que l'angle d'incidence est correctement fixé afin de récupérer le maximum d'information intéressante, notamment les contours des fragments et les zones d'ombre.
 - d'autre part, nous pouvons agir, sur le processus d'échantillonnage afin de réduire au maximum les erreurs d'échantillonnage. Le résultat d'une telle démarche devrait fournir un cahier des charges qui détermine le nombre d'images, les endroits convenables d'acquisition ainsi que la démarche de prise de la mesure.

- L'**amélioration de l'extraction de l'information 2D** concerne le filtrage du bruit que nous pouvons qualifier de résiduel à l'étape précédente, l'extraction correcte des contours des fragments et la mesure des surfaces de ces derniers.
- Concernant l'**amélioration de la stéréologie**, nous devons en premier lieu attribuer à chacune des surfaces précédentes une taille et un volume corrects. Dans un deuxième temps, il nous faut appréhender correctement l'information sous-jacente inaccessible à cause de la nature de la prise des échantillons par analyse d'images (recouvrement, chevauchement et ségrégation).
- l'**établissement d'un modèle de ségrégation des particules fines** prend en compte les particules fines non visibles à l'image et non prises en compte lors des calculs stéréologiques, et ce en raison de la ségrégation particulière qu'elles subissent.
- En aval, la dernière étape de résolution concernera la **correction des biais dus aux erreurs d'échantillonnage**. Il s'agit à ce niveau de définir et de corriger les erreurs d'échantillonnage, que nous pouvons qualifier de résiduelles à l'amont, qui entachent la mesure telle qu'elle est conduite par l'analyse d'image (erreur de prise, erreur de découpe, erreur de groupement etc...) [8] [20] [21] [19].

1.4.2 Problèmes étudiés

Nous avons axé nos premiers efforts sur l'étape de l'**extraction de l'information 2D**. Cette dernière s'avère, en effet, essentielle en ce qui concerne l'automatisation de la mesure. De plus, la pertinence des résultats des traitements 2D influence fortement la qualité des développements relatifs aux étapes suivantes.

Lors de cette étape, nous nous sommes penchés au début sur le problème de filtrage des images, la réduction de du bruit étant primordiale pour une bonne extraction des contours. Une nouvelle méthode de traitements d'images, basée sur l'extension au numérique d'opérateurs morphologiques, est adaptée aux différents cas d'images qui s'offrent à l'acquisition. Deux approches seront présentées : une information granulométrique par cercles maximaux inscrits à l'intérieur des fragments et une information de contours complets par segmentation.

Une fois la meilleure information surfacique extraite, le deuxième problème traité est celui de la **reconstruction de la courbe granulométrique des volumes**. Afin d'éviter une interférence entre les problèmes de modélisation volumique et ceux associés à l'existence de fragments inaccessibles à l'acquisition, cette étape a été décomposée en deux cas :

1. Le calcul des tailles et des volumes pour une disposition de fragments caractérisée par l'**absence de masquage**, notamment le recouvrement et le chevauchement (cas simulant l'acquisition sur convoyeur à bandes). La modélisation de la mesure des tailles et des volumes sera basée pour la majeure partie sur les **essais expérimentaux** que nous décrirons ultérieurement au cours du chapitre 4.
2. Ensuite, en tenant compte de quelques hypothèses sur la ségrégation des fragments, les **modèles de structures aléatoires** seront testés pour corriger les erreurs dues au masquage (cas d'une acquisition sur le tas et les engins de transport). Afin d'améliorer l'in-

formation utile à la modélisation du masquage, nous proposons une **nouvelle méthode d'acquisition** basée sur le changement de l'angle de l'incidence d'éclairement (chapitre 5).

Le diagramme (1.13) résume la démarche adoptée et référence les outils utilisés dans le cadre de cette thèse.

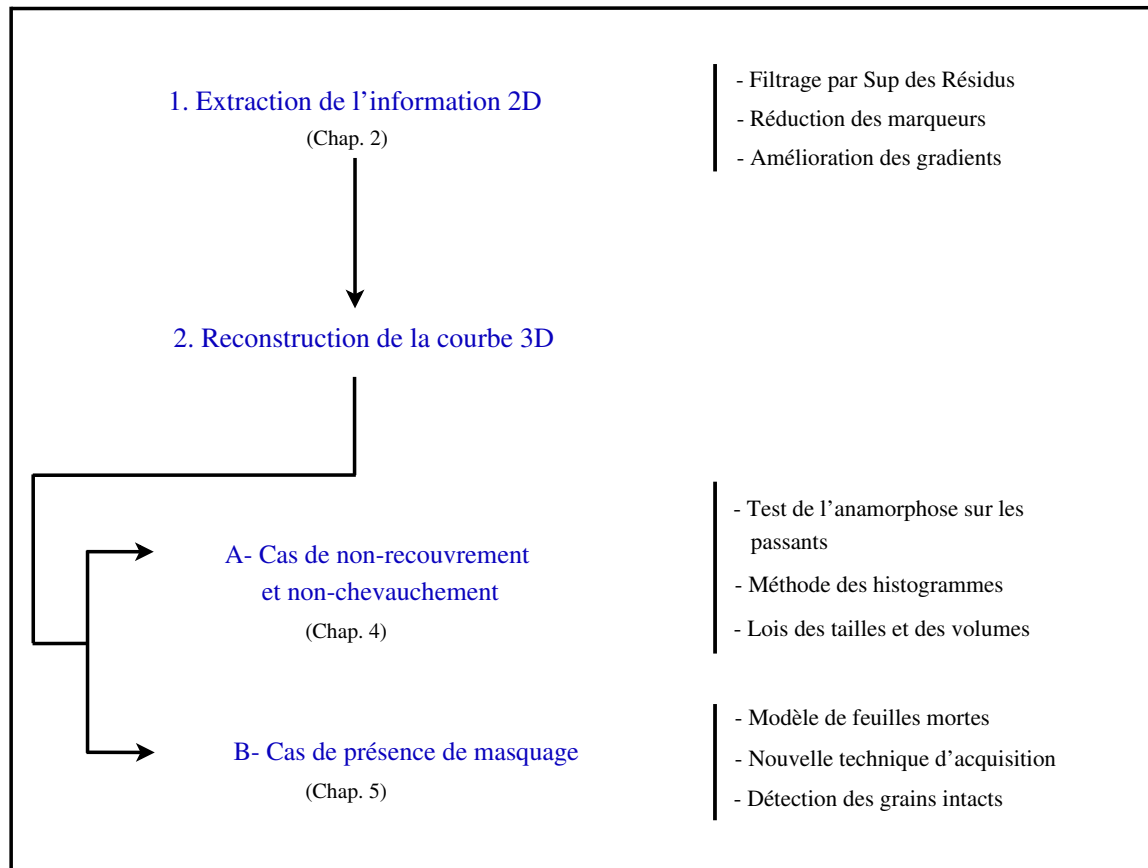


Fig. 1.13: Problèmes étudiés et démarche de résolution

1.5 Conclusion

Ce premier chapitre introductif a montré que, comme tous les moyens de mesure, la mesure de la distribution des tailles par analyse d'images est sujette à des erreurs. Celles-ci peuvent être dues aussi bien aux méthodes de prise de la mesure, ou aux moyens de traitements utilisés.

D'autre part, l'amélioration de la mesure finale dépend non seulement de la correction des erreurs relatives à chaque étape de mesure mais aussi de la prise en compte des différences conceptuelles entre l'analyse d'images et le tamisage, ce dernier étant la référence de la mesure.

Dans le présent travail de recherche nous nous sommes intéressés particulièrement à l'amélioration de la séquence de traitement qui se situe juste après l'acquisition, à savoir l'extraction de l'information des surfaces et la reconstruction de la courbe granulométrique des volumes équivalents aux images. Le chapitre suivant présente les techniques que nous avons développées dans le but d'extraire correctement l'information des surfaces 2D.

Deuxième partie

Mesure des surfaces des fragments
par analyse d'images

Transformations morphologiques, résolution des problèmes de filtrage et extraction de l'information 2D

Le chapitre précédent a fait l'objet d'une introduction générale de la problématique de la mesure par analyse d'image de la fragmentation des roches. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser en premier lieu aux différents outils morphologiques utilisés tout le long du chemin suivi pour simplifier et opérer la mesure des surfaces.

L'information la plus importante que nous cherchons à obtenir dans la présente étape concerne les contours des fragments. Le recours à la segmentation des images permet, en principe, d'atteindre cet objectif. Néanmoins, les conditions d'acquisition actuelles ainsi que les roches très texturées donnent lieu à des images fortement bruitées.

Nous montrons que les filtres largement utilisés dans la littérature, dits usuels, présentent bien des limites. Ces dernières sont discutées et à la lumière des conclusions tirées, la nouvelle approche de filtrage basée sur les résidus morphologiques est introduite. Après filtrage des images, nous présentons une autre nouvelle méthode d'extraction de l'information surfacique des fragments basée sur le contrôle des résidus. Enfin, les résultats de la segmentation des images moyennant l'algorithme de la ligne de partage des eaux valideront la pertinence de notre nouvelle démarche d'extraction de l'information 2D.

2.1 Opérateurs morphologiques de base

Initiée par les travaux de G. Matheron [44] et J. Serra [68] [69], la morphologie mathématique est basée sur une approche ensembliste de traitement. L'analyse des ensembles utilise la notion d'élément structurant, élément de base constitué d'un nombre de pixels et dont la forme et la taille sont choisies en fonction des caractéristiques géométriques des éléments intéressants à analyser.

Initialement adaptée aux images binaires, la morphologie traite le cas des images à niveau de gris en opérant sur les sous-graphes des fonctions numériques représentant l'image. Une généralisation plus puissante pour le cas numérique est celle fondée sur la théorie des treillis qui permet la définition d'opérateurs morphologiques sur toute sorte de données totalement ordonnées.

Dans ce qui suit, les principaux opérateurs morphologiques utilisés dans le cadre de cette étude seront introduits. Le but de leur utilisation sera principalement :

- le filtrage du bruit et la simplification de l'information intéressante ;
- l'extraction et essentiellement la segmentation des éléments intéressants de l'image ;
- la mesure des caractéristiques qualitatifs et quantitatifs de ces éléments (surface, taille, granulométrie, etc. ...).

2.1.1 Érosion et dilatation

L'érosion et la dilatation constituent les briques de base sur lesquelles reposent la majorité des opérateurs morphologiques.

Soit E l'espace qui contient les ensembles analysés (toute l'image) et $P(E)$ l'ensemble de tous les sous-ensembles de E . Si l'on prend comme élément structurant un ensemble $B \in P(E)$ repéré par son centre (ou origine), alors l'érosion et la dilatation sont définies comme suit :

- l'érosion d'un ensemble $X \in E$ par l'élément structurant B , notée $\epsilon_B(X)$, est l'ensemble formé par les centres de B lorsque ce dernier est totalement inclus dans X :

$$\epsilon_B(X) = X \ominus \check{B} = \{x \in E : B_x \subseteq X\} \quad (2.1)$$

où $B_x = \{x + y : y \in B\}$ est le translaté de B suivant le vecteur x ,
et \check{B} , le transposé de B par rapport à l'origine O (ou centre), est défini par :

$$\check{B} = -B = \{-x : x \in B\} \quad (2.2)$$

- La dilatation de X par l'élément structurant B , notée $\delta_B(X)$, est l'ensemble constitué par les centres de B lorsque l'intersection de ce dernier avec X n'est pas vide :

$$\delta_B(X) = X \oplus \check{B} = \{x \in E : B_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (2.3)$$

Pour le cas numérique, la généralisation consiste à changer l'inclusion et l'intersection binaires par le Supremum et l'Infimum numérique. Nous avons donc :

$$\text{Érosion : } \epsilon_B(f)(x) = (f \ominus B)(x) = \inf\{f(x + y), y \in B\} \quad (2.4)$$

La fonction érosion numérique $\epsilon_B(f)$ affecte ainsi à chaque pixel x la valeur minimale de la fonction f à l'intérieur de la fenêtre d'analyse définie par l'élément structurant B centré à l'origine (Fig. 2.1 - b et Fig. 2.2 - b).

$$\text{Dilatation : } \delta_B(f)(x) = (f \oplus B)(x) = \sup\{f(x - y), y \in B\} \quad (2.5)$$

De même, la fonction dilatation numérique $\delta_B(f)$ affecte à chaque pixel x la valeur maximale de la fonction f à l'intérieur de la fenêtre d'analyse définie par B (Fig. 2.1 - c et Fig. 2.2 - b).

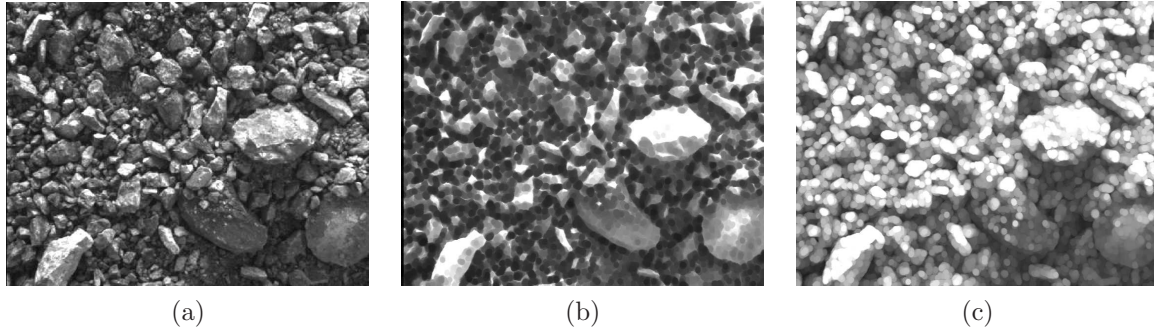


Fig. 2.1: (a) Image initiale f , (b) Érosion par un disque de taille 5 : $\epsilon_B(f)$, (c) Dilatation par un disque de taille 5 : $\delta_B(f)$

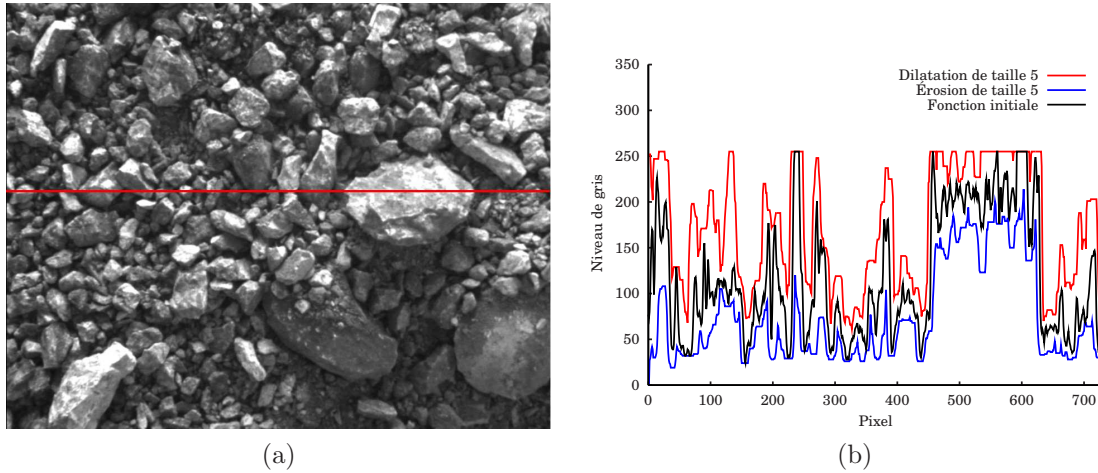


Fig. 2.2: (a) Coupe horizontale de l'image, (b) Fonctions numériques associées

2.1.2 Gradient morphologique

Parmi les opérateurs les plus simples qui découlent des deux transformations précédentes, il y a le gradient morphologique. Introduit par Beucher [3] il est défini comme étant la différence entre la dilatation et l'érosion par un élément structurant B .

$$\Delta(f) = \delta_B(f) - \epsilon_B(f) \quad (2.6)$$

où B est ici le disque unitaire centré à l'origine.

Au cours de cette étude, le gradient sera calculé sur les images à niveaux de gris pour mettre en valeur les contours des fragments. Ces derniers constituent les zones de transition, caractérisées par une variation d'intensité de niveau de gris, entre les régions homogènes de l'image. En principe, plus forte est la transition, plus grande sera la valeur du gradient (Fig. 2.3 et 2.4).

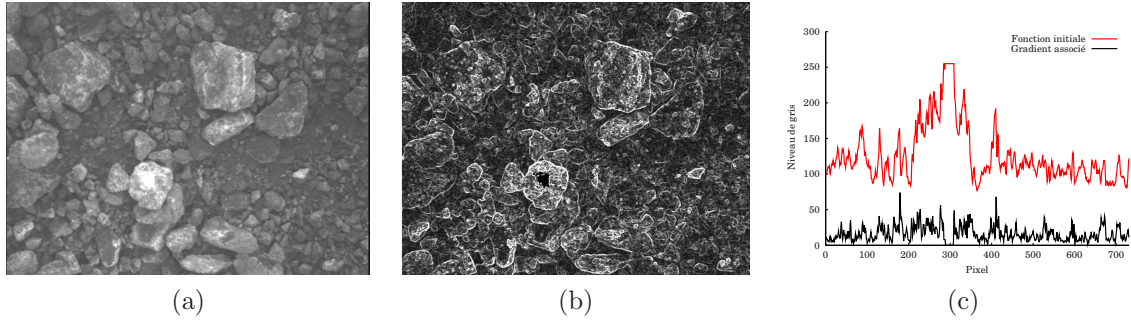


Fig. 2.3: (a) Image initiale, (b) Gradient associé ¹ : $\Delta(f)$, (c) Fonctions numériques

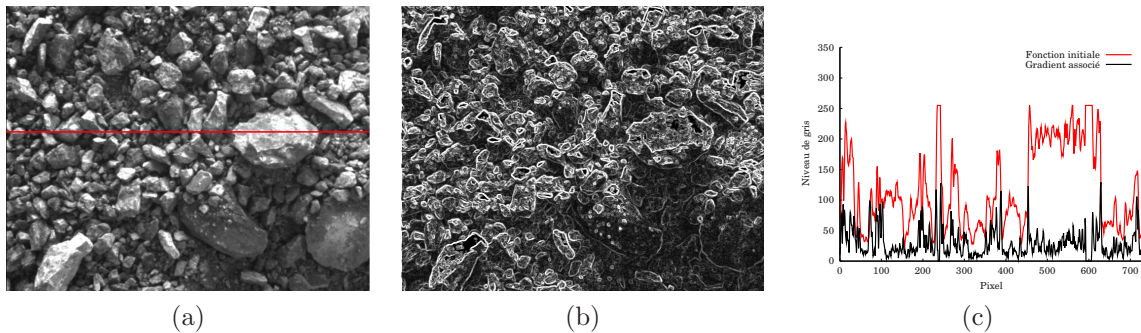


Fig. 2.4: (a) Image initiale, (b) Gradient associé : $\Delta(f)$, (c) Fonctions numériques

Comme le montrent les figures (2.3-b et 2.4-b) le résultat du gradient est une image à niveaux de gris pour laquelle :

- les maxima correspondent aux zones de fortes transitions de l'image initiale f , les principaux contours et le bruit notamment ;
- et les minima représentent les zones de l'image initiale dont le niveau de gris varie peu (zones homogènes).

1. Pour une meilleure illustration, certaines images de ce chapitre, telles que le “gradient”, la “fonction distance”, le “chapeau haut-de-forme”, ..., ont été multipliées par une constante.

2.1.3 Fonction distance

On peut également construire la fonction distance d'un ensemble binaire en utilisant l'opérateur de l'érosion. Étant une fonction numérique, elle associe à chaque point x de l'ensemble X sa distance à la frontière (qui correspond à X^c).

$$d_X(x) = \inf\{d(x, y), y \in X^c\} \quad (2.7)$$

où d est une distance définie sur \mathbb{R}^2 .

La procédure théorique de construction est la suivante :

- des érosions par un disque unitaire sont appliquées successivement à l'image binaire initiale jusqu'à disparition du plus grand élément,
- en même temps, dans l'image de distance, l'ensemble initial est codé à 1 puis le niveau de gris de chaque érodé est augmenté de l'unité jusqu'au dernier érodé.

Les érodés successifs de l'ensemble X constituent ainsi les sections horizontales de sa fonction distance.

Il existe cependant des algorithmes plus rapides et très efficaces pour le calcul de la fonction distance (Vincent, 1992) [76].

Les extrema de la fonction distance seront très utiles pour la segmentation. Généralement, selon leur pertinence ils constituent de bons indicateurs des fragments lors de l'utilisation de l'algorithme de la ligne de partage des eaux qui sera décrit ultérieurement.

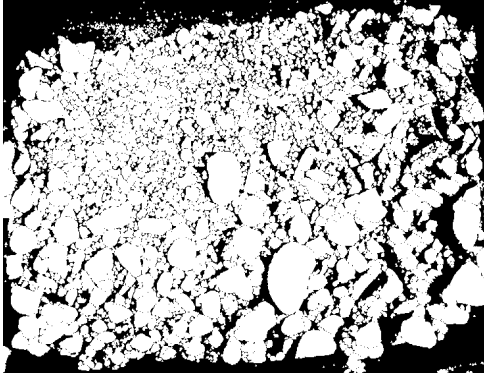


Fig. 2.5: Ensemble binaire initial : X

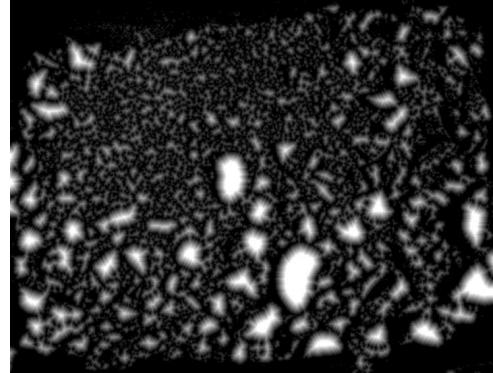


Fig. 2.6: Fonction distance associée : d_X

2.1.4 Ouverture et fermeture

Les combinaisons de l'érosion et de la dilatation peuvent être aussi utilisées pour construire deux opérateurs importants : l'ouverture et la fermeture.

Elles sont définies pour le cas binaire par les opérations suivantes :

$$\text{Ouverture : } \gamma_B(X) = \delta_B(\epsilon_B(X)) \quad (2.8)$$

$$\text{Fermeture : } \varphi_B(X) = \epsilon_B(\delta_B(X)) \quad (2.9)$$

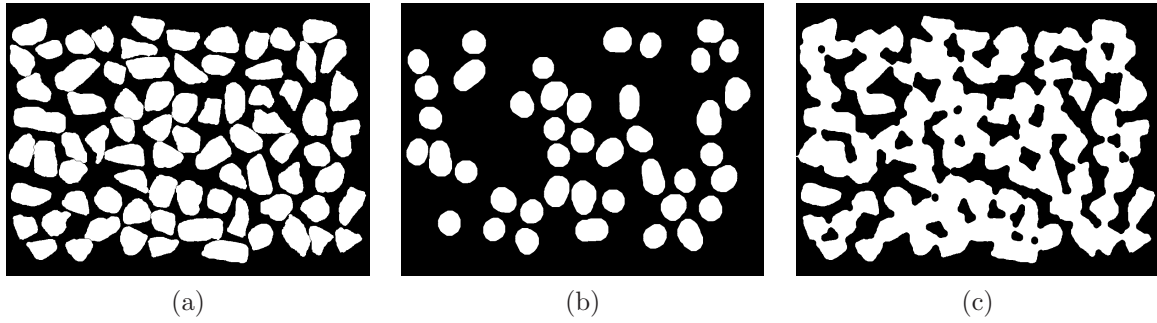


Fig. 2.7: (a) Ensemble binaire initial, (b) Ouverture par un disque de taille 30 : $\gamma_B(X)$, (c) Fermeture par un disque de taille 10 : $\varphi_B(X)$

Pour le cas binaire, l'ouverture a pour propriété d'éliminer tous les éléments ne pouvant pas contenir l'élément structurant et de lisser les contours. Et la fermeture comble tous les vides ayant une taille inférieure à celle de l'élément structurant (Fig. 2.7).

De même, pour le cas numérique, ces deux opérations sont définies comme suit :

$$\text{Ouverture : } \gamma_B(f) = \delta_B(\epsilon_B(f)) \quad (2.10)$$

$$\text{Fermeture : } \varphi_B(f) = \epsilon_B(\delta_B(f)) \quad (2.11)$$

Tout en préservant les vallées de l'image f , l'ouverture a pour effet d'éliminer les pics positifs représentant les irrégularités et les éléments qui sont plus étroits que l'élément structurant B (Fig. 2.9-a).

Par dualité, la fermeture sert à éliminer les vallées (ou pics négatifs) de l'image f représentant les irrégularités et les éléments qui sont plus étroits que l'élément structurant B (Fig. 2.9-b).

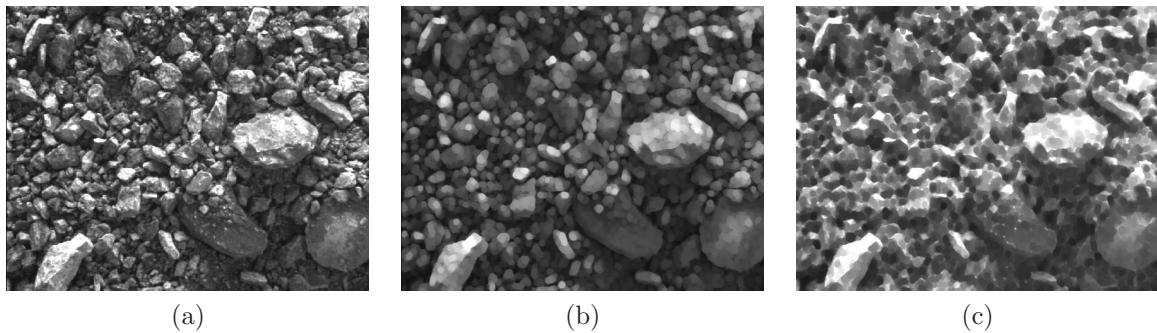


Fig. 2.8: (a) Image initiale, (b) Ouverture par un disque de taille 5 : $\gamma_B(f)$, (c) Fermeture par un disque de taille 5 : $\varphi_B(f)$

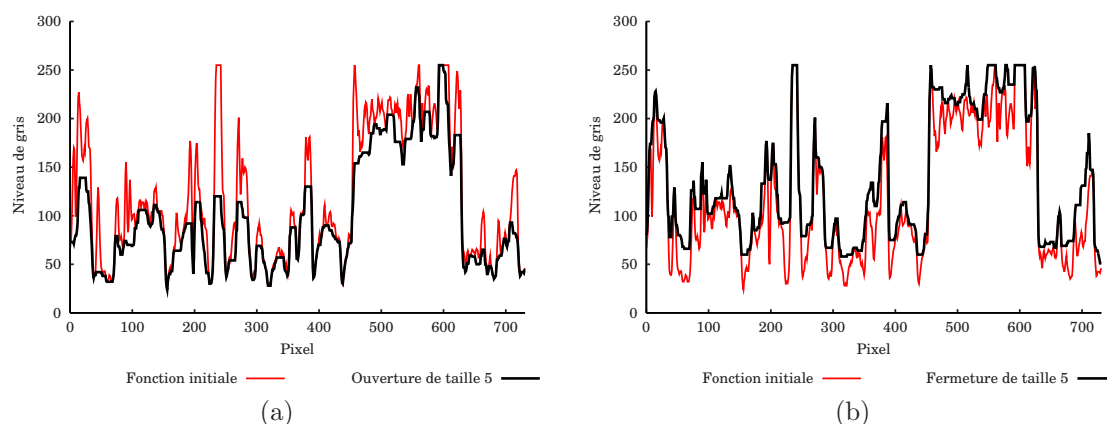


Fig. 2.9: (a) Fonctions numériques de l'image initiale et de son ouvert, (b) Fonctions numériques de l'image initiale et de son fermé

L'ouverture et la fermeture introduites ci-dessus sont dites par adjonction. Il existe, cependant, une définition plus générale de ces deux notions où l'on parle d'ouvertures et de fermetures algébriques.

Ainsi,

- toute transformation croissante, anti-extensive et idempotente est une ouverture algébrique,
- et toute transformation croissante, extensive et idempotente est une fermeture algébrique.

La croissance traduit la **conservation de la relation d'ordre** entre les fonctions, ou ensembles, avant et après transformation. L'anti-extensivité exprime le fait que la fonction qui résulte de la transformation est **inférieure** à la fonction originale (l'extensivité exprime le contraire). L'idempotence traduit l'**invariance** de la fonction transformée pour la même transformation.

En particulier, tout Supremum d'ouvertures est une ouverture et tout Infimum de fermetures est une fermeture.

Pour ce qui concerne les images de fragments de roches, l'utilisation du Supremum d'ouvertures et l'Infimum de fermetures par des segments orientés en fonction de la direction des textures sera très utile pour la réduction du bruit dû à ces dernières (type de traitement dit linéaire) (Fig. 2.10).

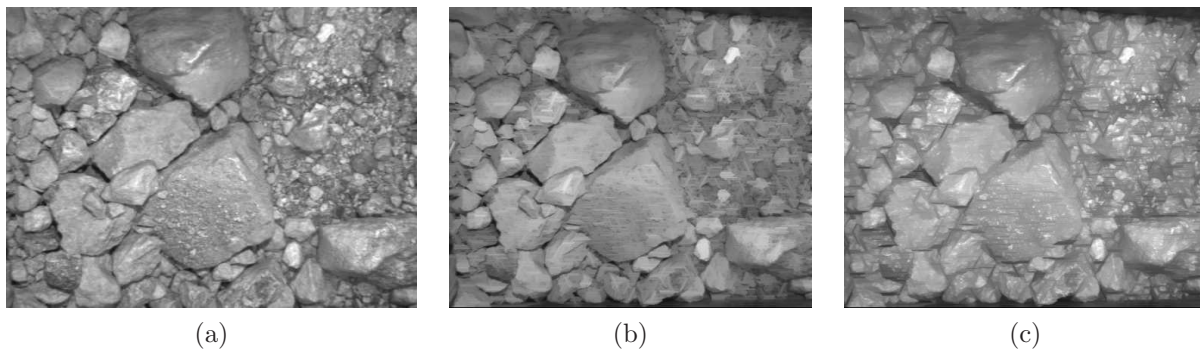


Fig. 2.10: (a) Image initiale, (b) Supremum d'ouvertures linéaires de taille 12, (c) Infimum de fermetures linéaires de taille 12

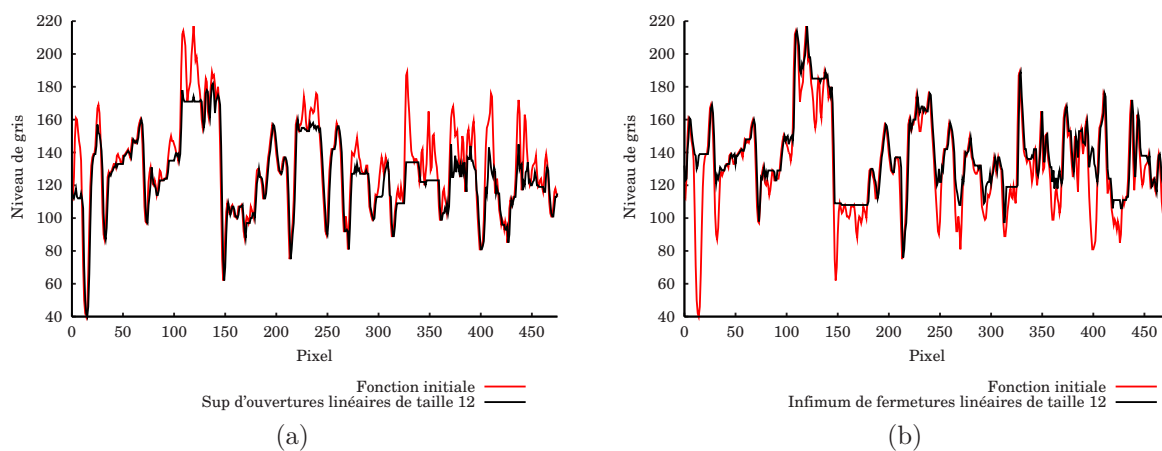


Fig. 2.11: (a) Fonctions numériques de la fonction initiale et du Supremum d'ouvertures linéaires de taille 12, (b) Fonctions numériques de la fonction initiale et de l'Infimum de fermetures linéaires de taille 12

2.2 Transformations utilisées pour le filtrage

Nous allons nous intéresser dans cette section à quelques transformations, découlant des opérateurs de base précédemment introduits, utilisées pour le filtrage des images de fragments de roches.

Dans le traitement d'images, le filtrage est une étape déterminante avant l'extraction de l'information surfacique 2D. Il est utilisé pour améliorer les images avant de pouvoir les analyser correctement. En effet, une extraction directe des éléments intéressants de l'image est rarement possible car les images brutes de fragments de roche en l'occurrence sont pour la plupart du temps très bruitées. La description des types de bruit qui entachent les images de fragments de roches fait l'objet du paragraphe suivant. Il sera suivi d'une définition des principaux filtres utilisés dans le traitement d'images, puis des transformations morphologiques employées spécialement dans le cadre de ce travail.

2.2.1 Motivation : Bruit affectant les images de fragments de roches

Les genres de bruits qui caractérisent les images de roches peuvent être classés comme suit :

- présence de textures sur les surfaces des fragments dont le caractère est complètement aléatoire (condition d'apparition non répétitive d'un fragment à l'autre). Elles peuvent se manifester par un niveau de gris nettement plus grand (pic) ou plus petit (trou) comparé au niveau de gris moyen de la surface. Elles peuvent aussi avoir la forme d'une traînée linéaire de niveau de gris différent du voisinage (figure 2.12 et 2.13) ;
- un autre type de bruit très fréquent correspond à la présence de fines particules regroupées ou positionnées sur les fragments. Ceci se traduit par des disparités de niveau de gris dans les régions concernées (figure 2.13 et 2.14) ;
- enfin, lorsque les images sont acquises sous un éclairage naturel rasant, le niveau de gris moyen des zones de transition et des surfaces des fragments de roches change fortement entre les régions de l'image (figure 2.13 et 2.15).

Dans ces conditions, l'application d'un concept global de filtrage est souvent problématique.

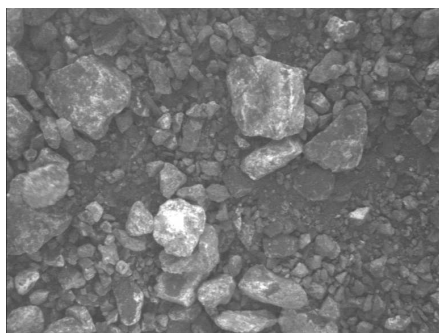


Fig. 2.12: Fragments de roches fortement texturés et présence de fines regroupées

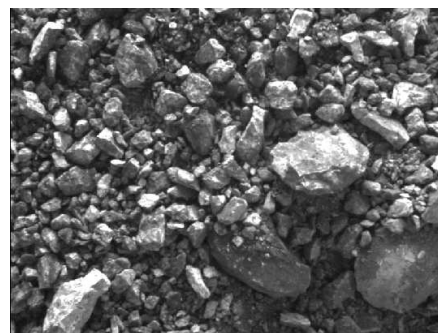


Fig. 2.13: Fragments de roches texturés avec fines regroupées sur les gros fragments



Fig. 2.14: Présence de fines regroupées et déposées sur gros fragments

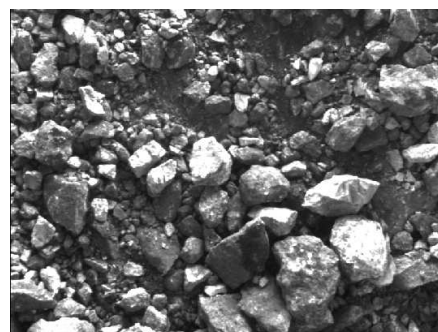


Fig. 2.15: Éclairage rasant et non-uniforme sur l'ensemble de l'image

D'un point de vue topographique, le relief de l'image est considéré comme trop accidenté donnant lieu à un nombre important d'extrema.

Plus loin, nous verrons, que les problèmes liés à ces types de bruit se manifestent lors de l'étape d'extraction des contours, avec les phénomènes de fusion et de sur-segmentation.

Dans le cas des images de fragments de roches, le filtrage peut être séparé en deux principales étapes :

- un **pré-filtrage** qui consiste à traiter ponctuellement l'image par rapport au bruit particulier qui la caractérise (texture particulière et présence de fines regroupées par exemple). Les opérateurs utilisés lors de cette étape seront locaux et varieront selon le type de bruit traité.
- suivi du filtrage proprement dit qui prend en compte le bruit qui caractérise l'ensemble des images (**lissage général des surfaces et amélioration des gradients**). Ainsi, pour un ensemble d'images de fragments de roches prises sensiblement sous les mêmes conditions d'éclairage, la procédure appliquée à ce niveau est généralement constante.

2.2.2 Type de filtres

Il existe deux grandes catégories de filtres : les **filtres linéaires** et les **filtres morphologiques**. Les premiers proviennent de l'extension des méthodes issues de la théorie du traitement du signal et utilisent la notion de **noyau** (2.1). L'image est alors considérée comme un signal bi-dimensionnel numérisé. Le filtrage est fondé sur la convolution du noyau sur les différents pixels de l'image.

$P_{i-1,j-1}$	$P_{i,j-1}$	$P_{i+1,j-1}$
$P_{i-1,j}$	$P_{i,j}$	$P_{i+1,j}$
$P_{i-1,j+1}$	$P_{i,j+1}$	$P_{i+1,j+1}$

TAB. 2.1: Noyau de taille 3x3

Une autre grande famille de filtres sont les filtres non-linéaires (comme le filtre médian), parmi lesquels il y a les filtres morphologiques qui utilisent quelques opérations utilisant les opérateurs de base que nous avons introduits.

En morphologie, les filtres sont définis comme étant des transformations morphologiques **croissantes** et **idempotentes** (J. Serra et G. Matheron [70]).

Déjà, l'ouverture et la fermeture décrits précédemment étant croissantes et idempotentes sont des filtres morphologiques. Cependant en introduisant des notions puissantes comme la **géodésie**, d'autres filtres peuvent être définis.

2.2.3 Transformation par reconstruction

Géodésie

En morphologie binaire, les transformations géodésiques, fondées sur la notion de distance géodésique, mettent en jeu deux ensembles X et Y appartenant à $P(E)$. Les ensembles X et Y sont appelés respectivement masque et marqueur géodésiques.

Les opérateurs les plus puissants et les plus évolués actuellement opèrent par géodésie. L'intérêt de l'utilisation de cette notion au cours de cette étude est porté principalement sur les deux opérateurs suivant :

- l'ouverture par reconstruction,
- et le bouchage de trous.

L'ouverture par reconstruction est une application directe de la dilatation géodésique définie comme suit.

Dilatation géodésique

Dans le cas binaire, la dilatation géodésique unitaire d'un ensemble Y à l'intérieur d'un masque X est définie par :

$$\delta_X^{(1)}(Y) = \delta(Y) \cap X \quad (2.12)$$

la dilatation géodésique de taille n est obtenue par itération :

$$\delta_X^n(Y) = \underbrace{\delta(\dots \delta(\delta(Y) \cap X) \cap X \dots)}_{n \text{ fois}} \cap X \quad (2.13)$$

La généralisation de la dilatation géodésique aux fonctions numériques s'effectue en changeant l'intersection par l'Infimum.

$$\delta_f^{(1)}(g) = \delta(g) \wedge f \quad (2.14)$$

$$\delta_f^n(g) = \underbrace{\delta(\dots \delta(\delta(g) \wedge f) \wedge f \dots)}_{n \text{ fois}} \wedge f \quad (2.15)$$

avec : $f \geq g$.

L'érosion géodésique est définie par dualité.

2.2.3.1 Ouverture avec reconstruction

L'ouverture par reconstruction est définie comme étant la dilatation géodésique infinie (jusqu'à idempotence) de l'érodé de taille n , pris comme marqueur, de l'ensemble Y :

$$\text{Pour le cas binaire : } \gamma_n^{rec}(Y) = \delta_X^\infty(\epsilon_n(Y)) = \delta_X^m(\epsilon_n(Y)) \quad (2.16)$$

$$\text{avec : } \delta_X^m(\epsilon_n(Y)) = \delta_X^{m+1}(\epsilon_n(Y)) \text{ (idempotence)} \quad (2.17)$$

$$\text{Pour le cas numérique : } \gamma_n^{rec}(f) = \delta_f^\infty(\epsilon_n(f)) \quad (2.18)$$

Dans le cas binaire, l'ensemble récupéré après cette transformation sera constitué des composantes de l'ensemble X (masque) qui contiennent une partie non vide de l'ensemble $\epsilon_n(X)$ (marqueurs). En pratique, les parties non vides correspondent à ce qui reste après un premier filtrage. La récupération des éléments qui sont à l'origine de ces parties constituera tout l'intérêt de la reconstruction (Fig. 2.16-c).

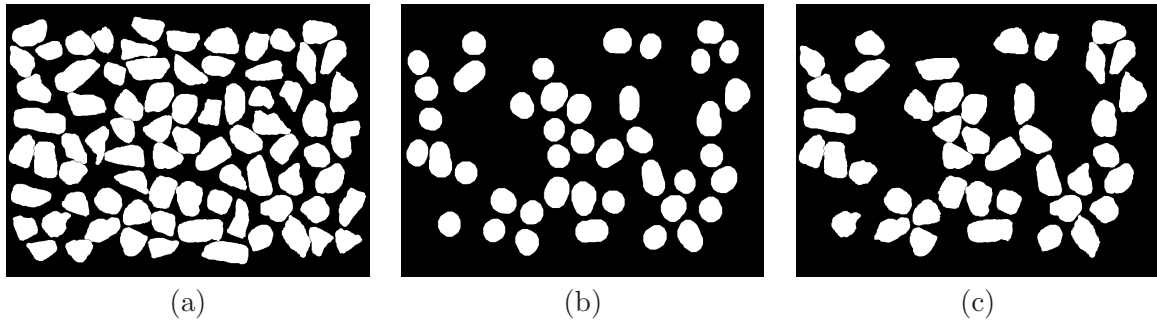


Fig. 2.16: (a) Ensemble binaire initial, (b) Ouverture par un disque de taille 30, (c) Ouverture avec reconstruction par un disque de taille 30

De même en numérique, l'ouverture par reconstruction ne modifie pas les contours des structures qui ne sont pas élimées par l'érosion (Fig 2.17-c et 2.18-b).

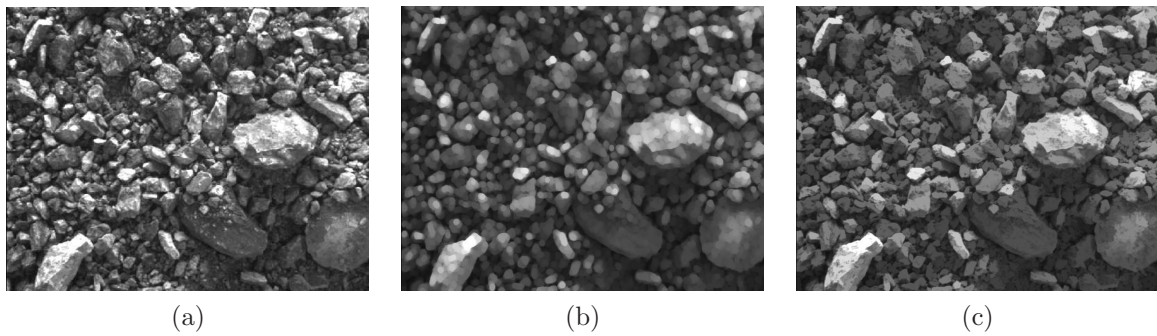


Fig. 2.17: (a) Image numérique initiale, (b) Ouverture par un disque de taille 5, (c) Ouverture avec reconstruction par un disque de taille 5

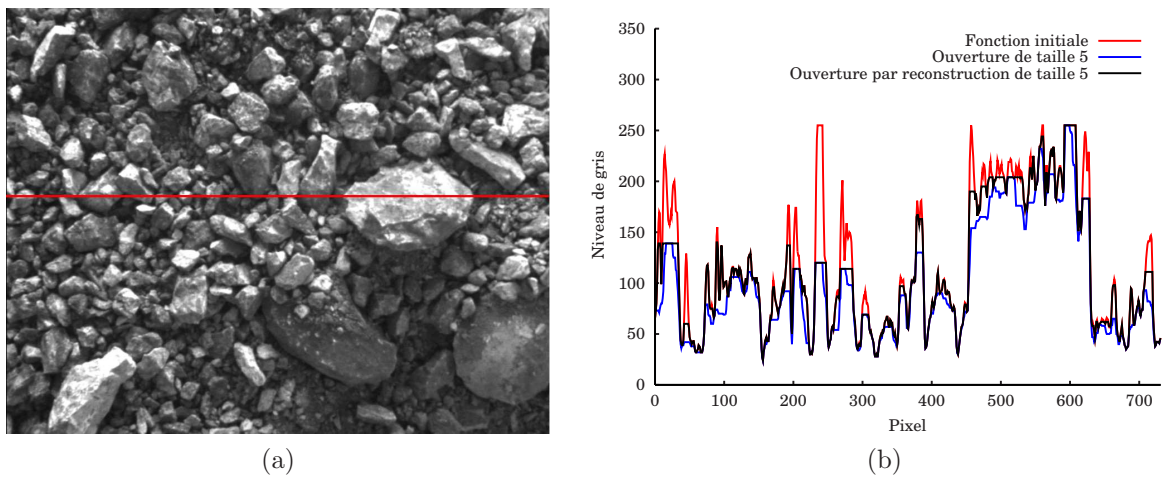


Fig. 2.18: (a) Coupe horizontale de l'image, (b) Fonctions numériques associées

2.2.3.2 Bouchage de trous

L'opération de bouchage des trous consiste à combler les trous qui se trouvent à l'intérieur des ensembles binaires ou dans les reliefs topographiques représentés par les fonctions numériques. Elle utilise aussi la reconstruction géodésique prenant comme marqueurs les bords du champ de l'image inverse (complémentaire de l'ensemble initial), cette dernière étant prise comme masque.

Pour le cas binaire, la transformation se formule comme suit :

$$X_{ch} = [\delta_{X^C}^\infty (X_{bord})]^C \quad (2.19)$$

où X_{ch} est le nouvel ensemble après bouchage des trous, X^C le complémentaire de l'ensemble initial X et X_{bord} les bords de l'image inverse.

2.2.4 Filtres alternés séquentiels

Les filtres alternés séquentiels sont aussi des filtres morphologiques. Ils s'obtiennent en recombinaison des ouvertures et des fermetures successives de taille croissante. La taille du dernier élément structurant tient compte de la taille minimale des objets que l'on désire conserver après filtrage. L'idée d'appliquer des filtres alternés (FAS) séquentiels est de pouvoir agir simultanément sur les structures claires et sombres de l'image (notamment les petites structures qui correspondent aux textures pour notre cas).

Un filtre alterné séquentiel de taille n est défini en numérique comme suit :

$$FAS_n(f) = \varphi_n \gamma_n \dots \varphi_2 \gamma_2 \varphi_1 \gamma_1(f) \quad (2.20)$$

Dans certaines applications, l'intérêt étant de simplifier les images tout en préservant les contours, on pourra être amené à utiliser des ouvertures et des fermetures par reconstruction. On parlera dans ce cas de filtres alternés séquentiels par reconstruction.

L'exemple suivant montre les résultats de l'application d'un FAS sans reconstruction et avec reconstruction sur la même image (Fig. 2.19, 2.20 et 2.21).

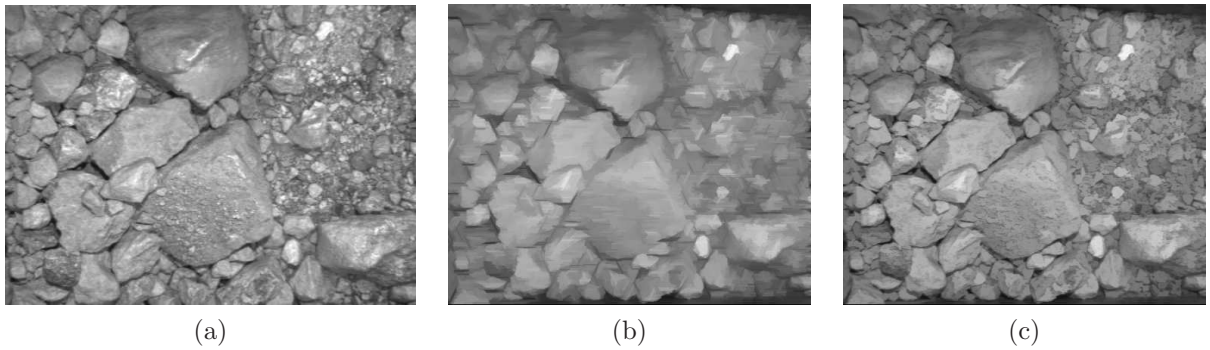


Fig. 2.19: (a) Image numérique initiale, (b) FAS de taille 12 sans reconstruction, (c) FAS de taille 12 avec reconstruction

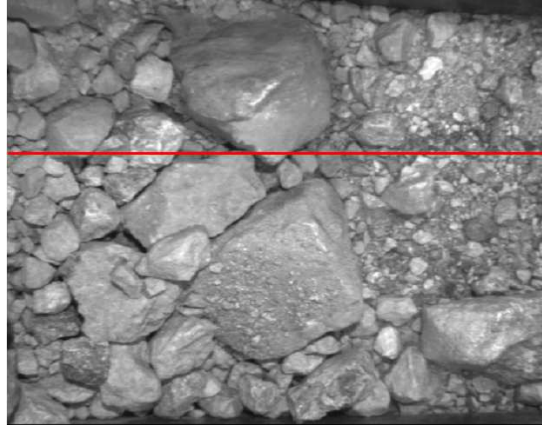


Fig. 2.20: Coupe horizontale

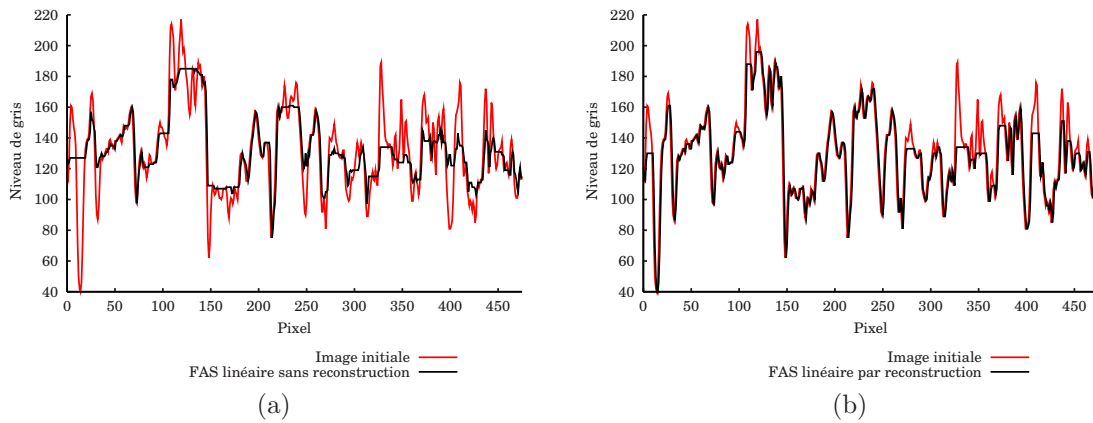


Fig. 2.21: (a) Fonction numérique représentant d'effet d'un FAS de taille 12 sans reconstruction, (b) Fonction numérique représentant d'effet d'un FAS de taille 12 avec reconstruction

Le profil des images montre bien la récupération des contours et des détails de l'image après reconstruction.

2.2.5 Granulométrie

Comme évoqué auparavant (section 1.1), la granulométrie consiste à étudier les tailles des objets d'un ensemble donné. La formulation mathématique de cette opération est basée sur la description physique du tamisage, plus particulièrement les propriétés intuitives suivantes :

1. après tamisage on obtient une partie du tout,
2. le résultat du tamisage d'une partie du tout est une partie du tamisage du tout,
3. l'utilisation successive de plusieurs tamis ne dépend pas de l'ordre choisi et le résultat final (en terme de passant) est celui obtenu pour le tamis de la plus grande taille.

Dans un sens large, d'après G.Matheron (1967) [44], une famille $(\psi_\lambda)_{\lambda \geq 0}$ de transformations (ou opération physique telle que le tamisage par exemple) dépendant d'un paramètre unique λ

(taille pour notre cas), constitue une granulométrie si et seulement si elle vérifie les trois axiomes suivants :

$$1. \forall \lambda \geq 0, \psi_\lambda \text{ est croissante} \rightarrow (f \leq g \Rightarrow \psi_\lambda(f) \leq \psi_\lambda(g)) \quad (2.21)$$

$$2. \forall \lambda \geq 0, \psi_\lambda \text{ est anti-extensive} \rightarrow (\psi_\lambda \leq Id) \quad (2.22)$$

$$3. \forall \lambda \geq 0, \forall \mu \geq 0, \psi_\lambda \psi_\mu = \psi_\mu \psi_\lambda = \psi_{\max(\lambda, \mu)} \quad (2.23)$$

Une conséquence de ce troisième axiome, qui exprime la loi d'absorption, est la propriété d'idempotence.

$$\forall \lambda \geq 0, \psi_\lambda(\psi_\lambda) = \psi_\lambda \quad (2.24)$$

Ainsi, moyennant l'utilisation d'un élément structurant convexe B on peut adjoindre la propriété d'absorption à une famille d'ouvertures successives par reconstructions $(\gamma_n)_{n \geq 0}$ par les homothétiques $(nB)_{n \geq 0}$, ce qui permettra de calculer par traitement d'images des granulométries au sens de Matheron. L'élément structurant utilisé sera plus particulièrement la meilleure approximation du disque selon la trame choisie.

Les mesures granulométriques par analyse d'images sur lesquelles portera cette étude concernent les surfaces des fragments après extraction des contours. Par conséquent, les calculs seront conduits sur les images binaires. La méthode de calcul des proportions granulométriques de l'ensemble des surfaces, (ou refus surfaciques) d'une image est la même décrite pour les refus massiques dans la section (1.1).

Pour une taille donnée i qui correspond à celle de l'élément structurant convexe choisi, la proportion granulométrique surfacique est calculée comme suit :

$$P_i = 100 \left(1 - \frac{S(\gamma_i^{rec}(X))}{S(X)} \right) [\%] \quad (2.25)$$

où $S(\gamma_i^{rec}(X))$ est l'aire de l'ouvert par reconstruction de taille i de l'ensemble X (représentant l'image binaire des fragments de roches), et $S(X)$ l'aire de l'ensemble des fragments. S est une mesure discrète, plus précisément c'est le nombre des pixels représentant les surfaces des fragments en question.

Remarque

Il est important de noter que l'utilisation de l'ouverture par reconstruction au lieu de l'ouverture tient au fait de vouloir considérer chaque surface de fragment en entier lors de l'analyse granulométrique. En effet, l'emploi d'ouvertures standards tend à affecter, lors des ouvertures successives, les bords des fragments à des classes de petites tailles jusqu'à ce que ce dernier atteigne la taille de l'élément structurant qui le fait complètement disparaître.

C'est identiquement le même phénomène, dit d'alimentation des classes, constaté pour le cas des ouvertures successives pour le cas de granulométries calculées pour des contours partiels. En conséquence, dans le cadre d'une analyse intrinsèque de chaque surface de fragment, une telle granulométrie est forcément biaisée (Fig. 2.22). La seule exception est le cas où tous les fragments sont parfaitement circulaires.

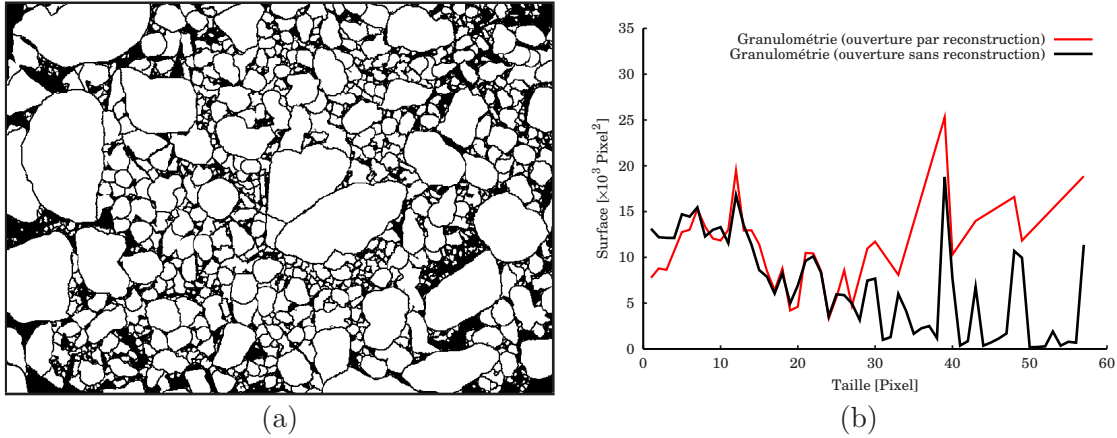


Fig. 2.22: (a) Ensemble binaire initial, (b) Granulométries en surfaces calculées avec et sans reconstruction

2.2.6 Chapeau haut-de-forme

Le dernier opérateur qui sera utile pour le filtrage est le chapeau haut-de-forme. Il découle aussi de la fermeture et de l'ouverture présentées auparavant.

Introduit par Meyer (1977) [46] [45], l'opérateur chapeau haut-de-forme (top-hat), appliqué essentiellement aux images numériques, est utilisé pour extraire les régions contrastées vis à vis de l'environnement.

Deux genres de chapeaux haut-de-forme sont calculés, selon qu'on s'intéresse à extraire les zones claires (composantes positives du signal), ou les zones sombres (composantes négatives du signal).

Le premier, dit chapeau haut-de-forme blanc, qui sert à extraire les pics positifs correspond au résidu entre l'image initiale et l'ouverture de taille λ :

$$\rho_n^+(f) = f - \gamma_n(f) \quad (2.26)$$

Le chapeau haut-de-forme noir, défini par dualité, correspond au résidu entre la fermeture de taille λ et l'image initiale :

$$\rho_n^-(f) = \varphi_n(f) - f \quad (2.27)$$

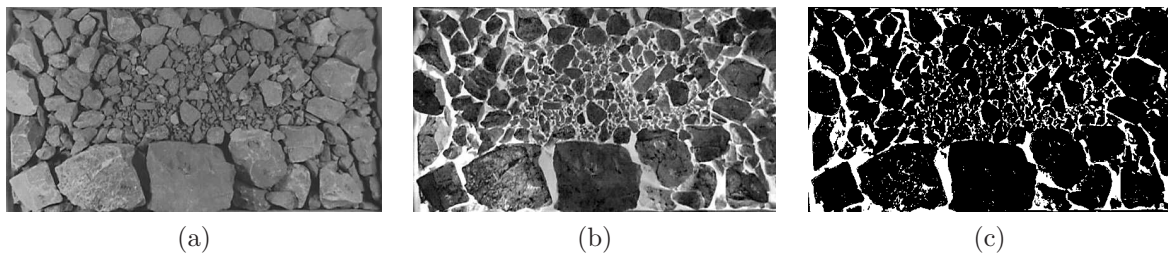


Fig. 2.23: (a) Image numérique initiale, (b) Chapeau haut-de-forme noir de taille 30, (c) Image chapeau haut-de-forme seuillée

La figure (2.23) montre un exemple d'utilisation du chapeau haut-de-forme noir pour l'extraction des interstices entre les fragments de roches.

2.2.7 Remarque

Notre objectif d'introduire les différents outils morphologiques qui seront employés tout le long de ce travail pour le filtrage est à présent atteint. Les premiers tests de filtrages concerneront les filtres à noyau. En second lieu ce seront les apports des filtres morphologiques qui seront analysés. Avant de pouvoir juger de la pertinence de ces filtrages, nous allons introduire une dernière transformation très puissante en analyse d'image qui est la ligne de partage des eaux. En effet, l'accès aux contours des fragments après filtrage moyennant l'algorithme de la ligne de partage des eaux permettra d'évaluer correctement les résultats obtenus.

2.3 Segmentation morphologique : la ligne de partage des eaux

Dans cette section nous proposons de décrire la ligne de partage des eaux (LPE) qui se présente comme l'outil actuel de segmentation le plus puissant en morphologie mathématique. Elle sert plus précisément à définir les régions disjointes incluses dans la partition définie par l'image. Comme son nom le suggère, son concept est basé sur une interprétation topographique de l'image.

Il s'ensuit que l'application de son concept sera particulièrement intéressante lorsqu'il s'agira d'images à niveaux de gris. Faisant appel en partie aux mêmes notions précédemment introduites de géodésie, la LPE est construite généralement sur l'image gradient à partir des marqueurs des régions à extraire.

A l'origine, la LPE a été introduite et formalisée par Beucher et Lantuejoul [3] [34] [5] [6]. Des contributions importantes ont suivi concernant la notion de marquage par Meyer et Beucher [48], et l'implémentation de son algorithme par la méthode des files d'attente hiérarchiques Meyer [47].

Définition

Lors du calcul de la LPE, les structures les plus intéressantes du relief topographique, représenté par une fonction numérique f , qui vont être considérées sont : les **minima régionaux** et les **bassins versants**.

Les minima du relief topographique (fonction f) définissent les creux ou les vallées. Si on considère un minimum M , le bassin versant qui lui est associé est l'ensemble des points x de f telle qu'une goutte d'eau tombant en x finit par rejoindre le fond de la vallée associée à M .

Pour la construction des bassins versants, une inondation progressive du relief est débutée simultanément à partir de l'emplacement des minima (pris comme sources). Avec la progression de l'inondation chaque fois que les eaux provenant de deux bassins versants sont susceptibles de se mélanger, un barrage est construit en chaque éventuel point de contact. Lorsque l'ensemble du relief est inondé, les barrages élevés et entourés d'eau constituent la LPE (Fig. 2.24).

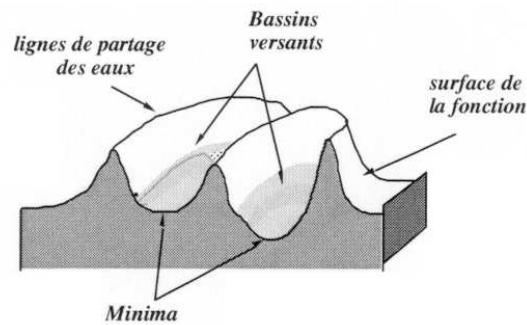


Fig. 2.24: Caractéristiques du relief topographique et ligne de partage des eaux

Par construction, les lacs finaux délimités par les barrages sont en nombre égal aux minima du relief, et ce sont plus précisément les bassins versants associés à ces minima.

Marquage

Le gradient morphologique, introduit précédemment, est un bon indicateur des contours (zones de transition dans l'image initiale). Calculée sur le gradient, la LPE correspond ainsi aux zones de crêtes autour des minima.

Cependant, deux problèmes apparaissent pour le cas des images réelles, celles des fragments de roche notamment :

- l'intensité des zones de transitions n'étant pas égale partout sur l'image (existence de contours peu contrastés). Il n'est ainsi pas possible d'extraire directement les contours intéressants. En effet, on rencontre le même problème de seuillage qui donne lieu à des contours partiels et peu précis.
- la sensibilité du gradient aux faibles variations d'intensité entre pixels dues au bruit, fait qu'il est caractérisé par un très grand nombre de minima, donc de bassins versants équivalents.

En conséquence, la construction de la LPE sur l'image gradient à partir de ses minima produit un nombre très important de régions. Ceci se traduit par une sur-segmentation et une fusion des régions importantes de l'image (fragments de roches pour notre application) (Fig. 2.25).

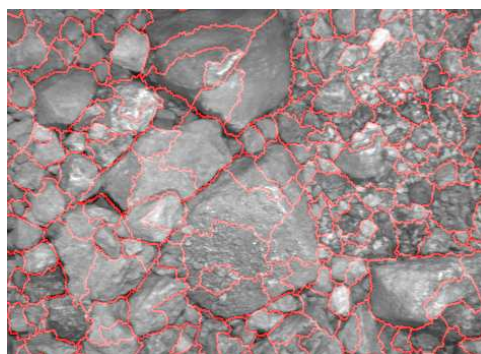


Fig. 2.25: Problème de marquage : sur-segmentation et fusion des fragments

Afin d'éviter ce problème, l'idée consiste à construire la LPE sur le gradient mais à partir d'un nombre réduit de minima choisis de façon à localiser correctement les zones de l'image les plus importantes (celles qui correspondent aux fragments pour notre application). On parle, dans ce cas, de construction de LPE contrôlée par **marqueurs**, et c'est là, toute la puissance de la méthode.

L'algorithme qui permet d'imposer les minima choisis à l'image gradient utilise la reconstruction géodésique introduite précédemment :

$$g' = \epsilon_{mrk}^{rec}(g \wedge mrk) \quad (2.28)$$

où :

- g est la fonction gradient initiale,
- mrk est la fonction marqueurs. Elle est égale à zéro au niveau des nouveaux minima (marqueurs) et ∞ ailleurs,
- ϵ^{rec} est l'érosion géodésique,
- et g' est la fonction gradient modifiée.

Enfin, comme pour le cas d'une inondation à partir des minima du gradient initial, le nombre des bassins versants obtenus après modification du gradient, dite modification d'homotopie, est exactement égal au nombre de marqueurs.

2.4 Pré-filtrages des images de fragments de roches

Pour remédier aux problèmes rencontrés lors de la segmentation par LPE, utilisant comme marqueurs les minima du gradient de l'image initiale, nous allons tenter de simplifier l'image avant d'en extraire les marqueurs significatifs (un marqueur par fragment) et de calculer son gradient. Notre objectif étant notamment d'extraire correctement les contours des différents fragments de l'image.

Ainsi, l'objectif final poursuivi sera la réduction du nombre important des minima du gradient et l'amélioration de l'extraction de ses lignes de crêtes (rehaussement des contours).

Pour ce faire, nous nous proposons de tester, en premier lieu, les deux catégories de filtres précédemment introduits : les filtres à noyau et les filtres morphologiques. Dans cette première étape, ces pré-filtrages, comme évoqué auparavant, auront pour but la préparation des images à l'étape de réduction des minima qui fera l'objet de la section (2.5).

Les filtres seront appliqués à deux images de fragments de roches représentant deux conditions de bruit souvent rencontrées dans la pratique. Ainsi :

- la première image est caractérisée par un éclaircissement non-uniforme sur l'ensemble de l'image et une présence moyenne de textures (Fig. 2.26-a).
- La seconde est caractérisée par un fort degré de texture de la roche et une présence de régions de particules fines regroupées (Fig. 2.26-b).

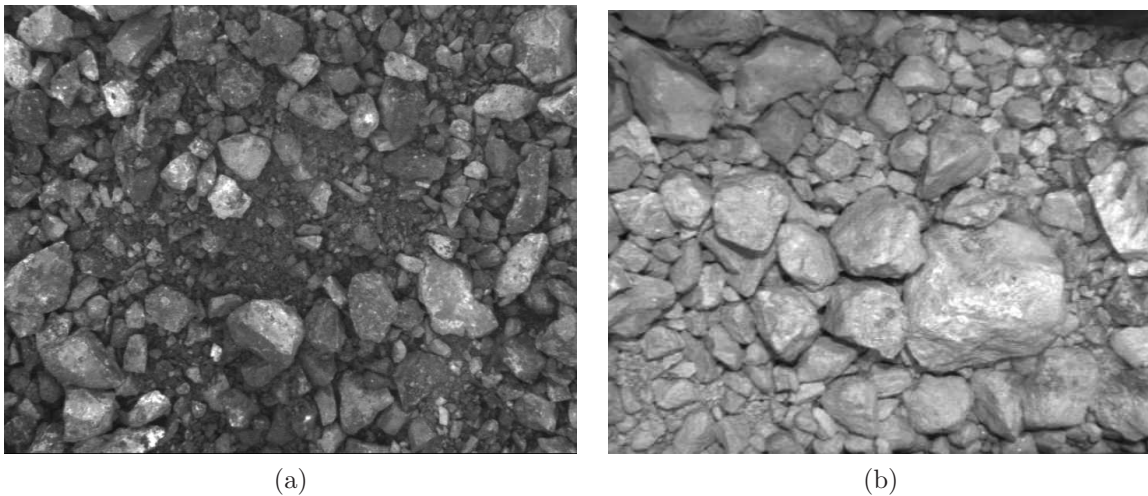


Fig. 2.26: (a) Image N°1, (b) Image N°2

Pour juger de la pertinence des traitements qui suivent, nous nous baserons, en plus de l'indication fournie par le nombre et l'emplacement des marqueurs, sur les résultats de la construction de la LPE sur le gradient de l'image filtrée à partir de ces derniers.

2.4.1 Filtre linéaire

Le filtre linéaire testé est le **Gaussien** dont le noyau est schématisé par la figure (2.27).

$1/16$	$2/16$	$1/16$
$2/16$	$4/16$	$2/16$
$1/16$	$2/16$	$1/16$

Fig. 2.27: Noyau du filtre Gaussien de taille 3×3

La description de la séquence de traitement pour les deux images est la suivante :

- en premier lieu, pour prendre en compte la petite taille des textures, l'image initiale est filtrée par une gaussienne dont la taille du noyau est de taille 3×3 . Puis, afin de constater les effets du filtrage sur l'image, le filtre est itéré dix fois (Fig. 2.28-a et 2.29-a).
- Les nouveaux marqueurs considérés sont pour cet exemple les maxima de l'image initiale filtrée et non les minima du gradient (Fig. 2.28-c et 2.29-c). Le gradient sur lequel est construite la LPE est celui de l'image initiale.
- En effet, ceci est justifié par le fait que le flou constaté, dû au filtrage, donne un gradient avec des zones de transition assez étalées comparés aux contours réels (Fig. 2.28-b et 2.29-b). De plus, les minima du gradient de l'image filtrée sont largement plus nombreux que les maxima de l'image filtrée. Nous reviendrons sur les causes de ces insuffisances plus loin, cependant nous pouvons noter qu'ils constituent une amélioration du traçage de la LPE pour ce test de filtrage (Fig. 2.28-e et 2.29-e).
- Enfin, l'image binaire illustre le résultat de la segmentation (Fig. 2.28-f et 2.29-f).

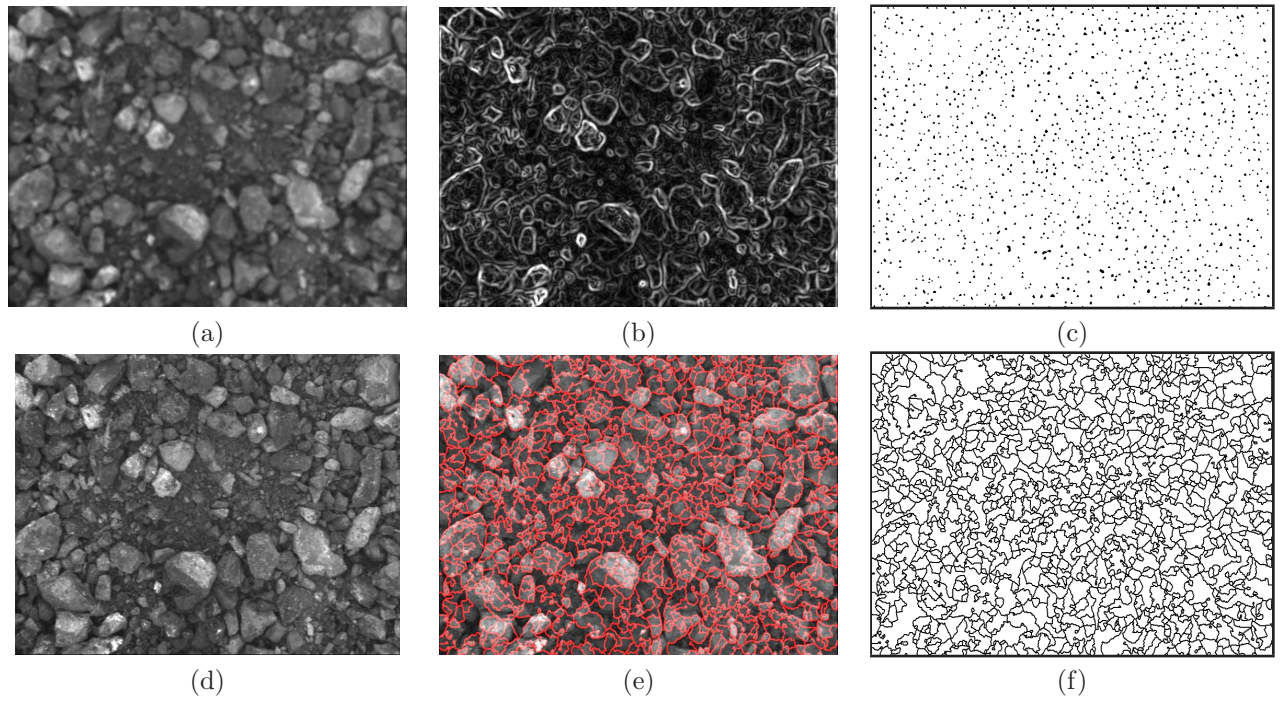


Fig. 2.28: Image N°1 : (a) Filtrage gaussien de taille 3×3 itéré dix fois, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Maxima de l'image filtrée, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire

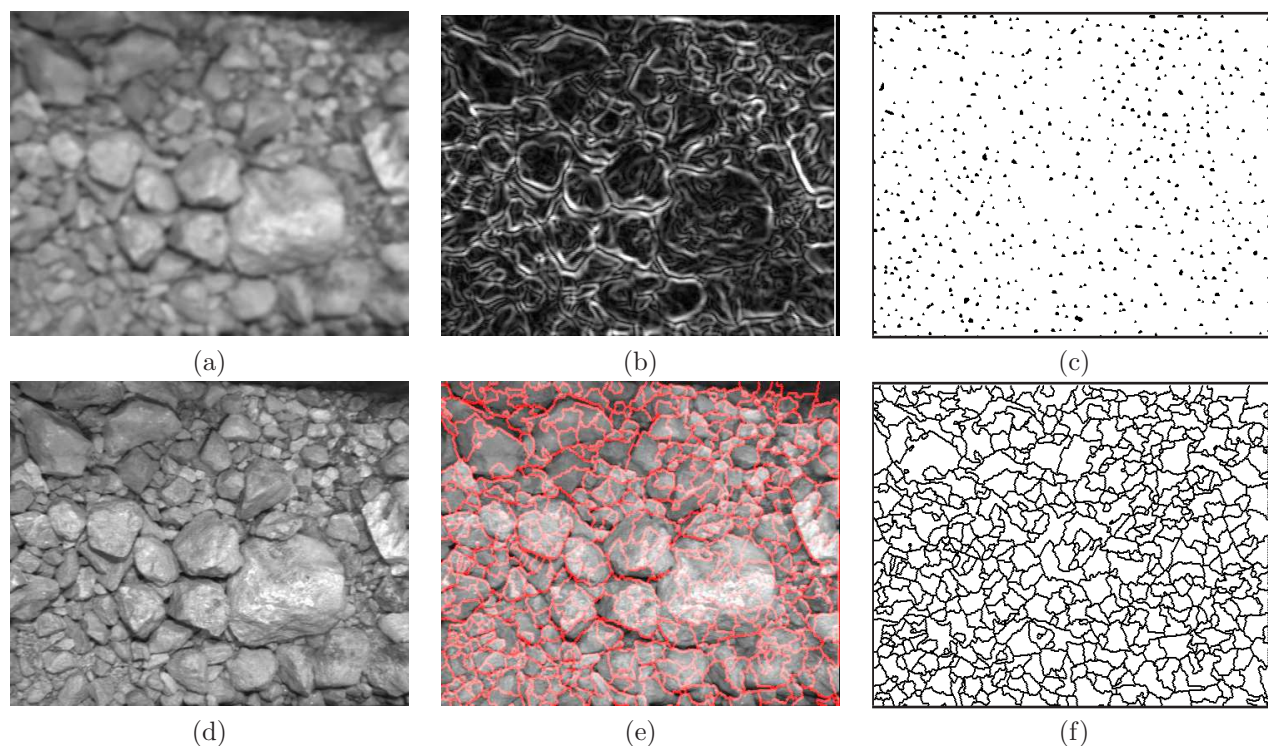


Fig. 2.29: Image N°2 : (a) Résultat du filtrage gaussien de taille 3×3 itéré dix fois, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Minima du Gradient, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire

Commentaires sur le pré-filtrage Gaussien

On remarque que ni la position ni le nombre des marqueurs issus du filtrage ne sont pertinents. Ils ne permettent pas ainsi de localiser correctement les fragments présents à l'image. La construction de la LPE sur le gradient de l'image initiale fournit une image binaire sur-segmentée confirmant ainsi l'insuffisance de ce type de filtrage.

Ce premier test a confirmé que, comme on pouvait s'y attendre, les filtres gaussiens agissant localement (traitement de voisinages de pixels) ne sont pas aptes à réduire convenablement les extrema des images numériques et dégradent les zones de transition intéressantes.

2.4.2 Filtres non-linéaires

Les tests de filtrage que nous présentons dans cette section concernent :

- le filtre médian qui sera évalué comme premier exemple de filtres non-linéaires. Basé aussi sur la notion de noyau, la valeur du pixel central pour ce filtre est donnée par la médiane des pixels de la fenêtre. La séquence de traitement est identique à celle décrite pour le filtre gaussien (Fig. 2.30 et 2.31).
- La seconde méthodologie de filtrage est basée sur la morphologie mathématique. Pour prendre en compte l'existence de textures linéaires ainsi que des zones de fines regroupées,

le filtrage est effectué par FAS linéaire de taille 14 avec reconstruction (les ouvertures et les fermetures utilisées correspondent respectivement au Sup et à l'Inf d'ouvertures et de fermetures linéaires avec reconstruction dans toutes les directions de l'espace).

Les nouveaux marqueurs considérés sont aussi les maxima de l'image initiale. La LPE est tracée sur l'image qui correspond au Supremum du gradient de l'image filtrée et de son chapeau haut-de-forme de taille 10 (Fig b). En effet, l'utilisation de ce dernier permet d'améliorer le positionnement des contours sur l'image gradient (Fig. 2.32 et 2.33).

1. Filtre médian

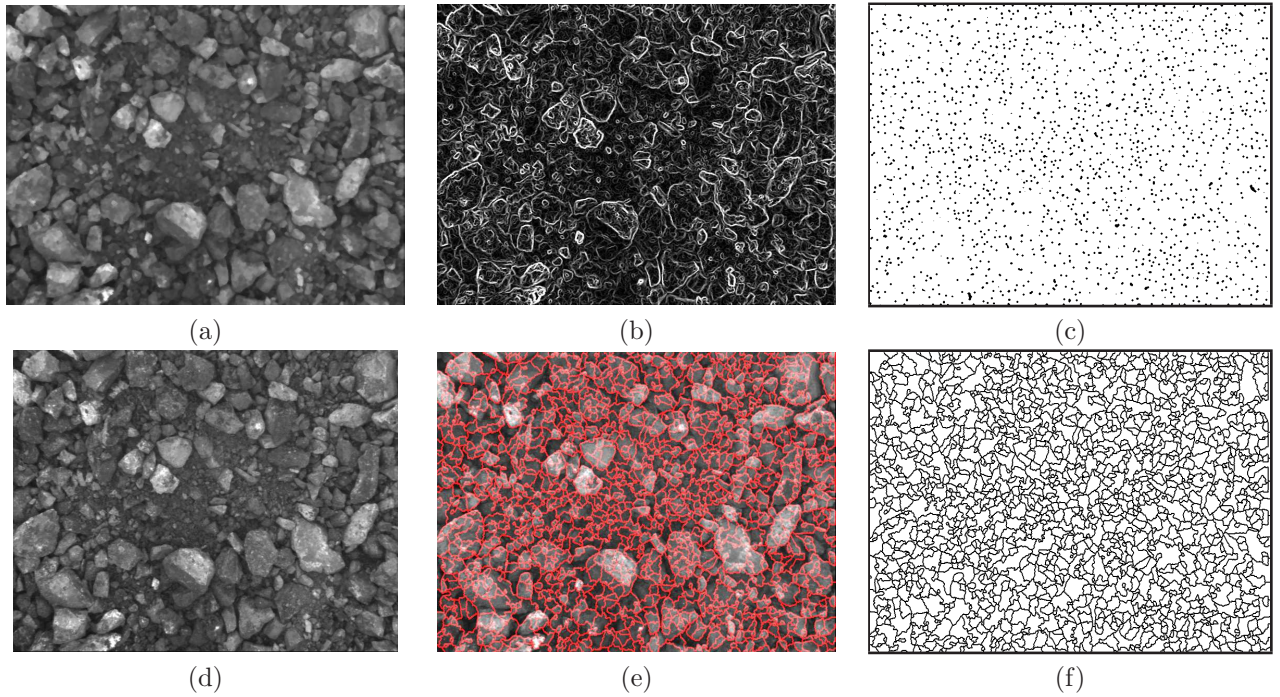


Fig. 2.30: Image N°1 : (a) Résultat du filtrage médian de taille 3×3 itéré dix fois, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Minima du Gradient, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire

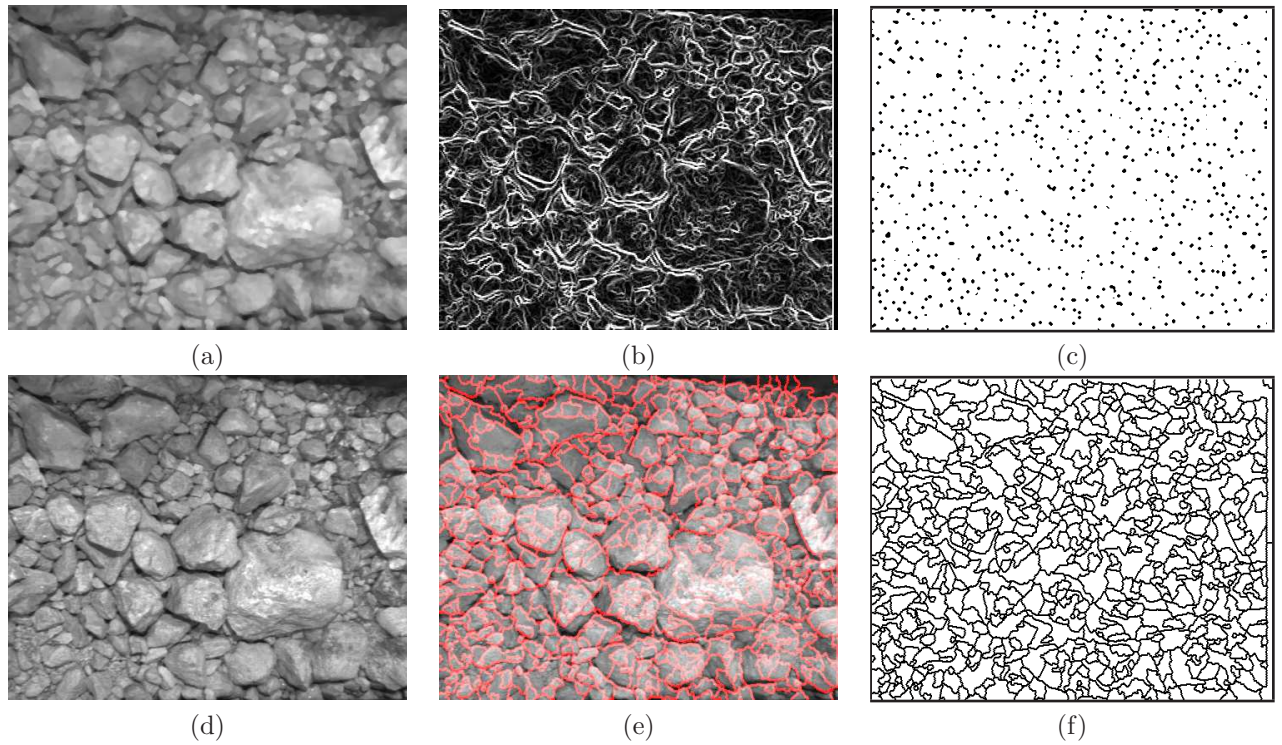


Fig. 2.31: Image N°2 : (a) Résultat du filtrage médian de taille 3×3 itéré dix fois, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Minima du Gradient, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire

2. Filtres morphologiques

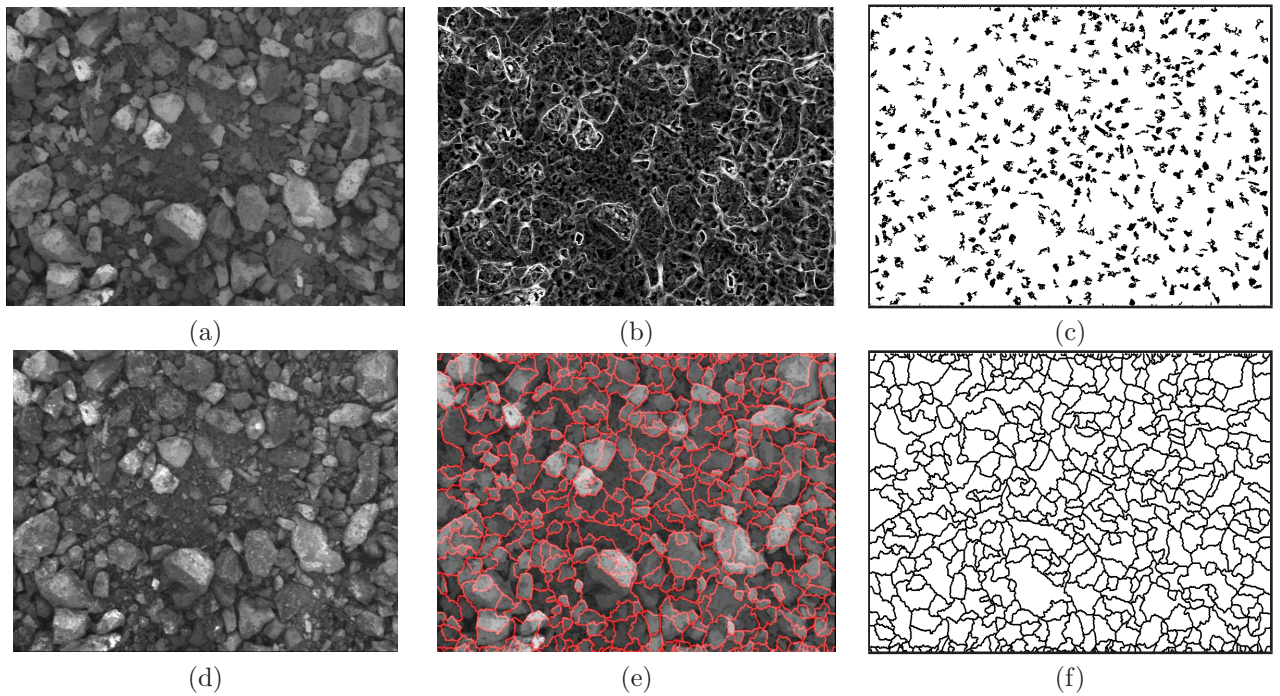


Fig. 2.32: Image N°1 : (a) Résultat d'un filtrage alterné séquentiel de taille 14, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Minima du Gradient, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire

Commentaires sur le pré-filtrage non-linéaire

Les résultats des filtrages précédents nous permettent de faire les constatations suivantes :

Filtre médian

- L'effet de flou qui dégradait les contours de l'image n'est pas constaté pour ce filtre.
- Néanmoins, comme pour le cas du gaussien, les nouveaux marqueurs restent trop nombreux et incorrectement positionnés pour pouvoir éviter les problèmes de fusion et de sur-segmentation.

Filtre morphologique

- Malgré le fait que le marquage soit amélioré pour ces derniers filtres, donnant lieu à des partitions plus grandes comparées aux filtres précédents, les problèmes de sur-segmentation et de fusion persistent.
- Toutefois, on note que le positionnement des marqueurs est légèrement amélioré. De plus, comme prévu, la reconstruction semble préserver les contours des fragments.

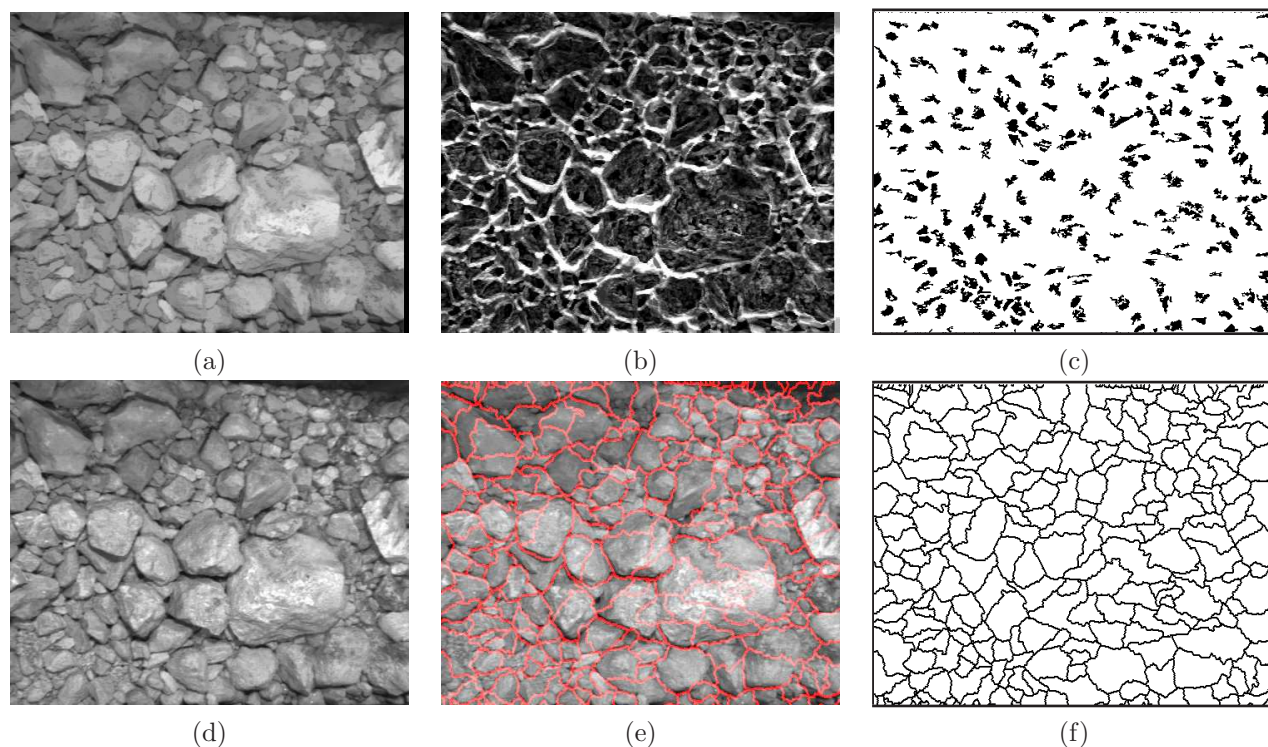


Fig. 2.33: Image N°2 : (a) Résultat d'un filtrage alterné séquentiel de taille 14, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Minima du Gradient, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire

2.4.3 Synthèse du pré-filtrage

Lors de cette étape de pré-filtrage, nous nous sommes intéressés à un aspect local de filtrage que nous avons évalué sur la base des résultats de la segmentation.

Les tests de ces filtres simples ont montré qu'ils ne sont pas aptes à répondre pleinement à notre objectif de réduction des extrema de l'image initiale pour l'obtention de bons marqueurs. Cependant, ils serviront à simplifier les images pour les traitements qui vont suivre.

A cet égard, nous avons pu constater que les filtres morphologiques présentent l'avantage de ne pas déplacer ni déformer les contours. Par ailleurs, étant donné que la LPE utilise un critère de contraste, un pré-filtrage sera considéré correct d'autant plus qu'il aura tendance à préserver les contours des fragments. D'où la supériorité des filtres morphologiques qui seront privilégiés dans cette phase de pré-filtrage. Les filtres à noyaux seront plutôt utilisés s'ils sont adaptés aux images en question.

2.5 Filtrage : amélioration du marquage

Nous avons vu que les pré-filtrages appliqués aux images réduisent le bruit et par conséquent les éventuels marqueurs pour un détournage correct des fragments par LPE. Cependant, cela reste insuffisant à l'obtention d'images sans problème de sur-segmentation et même de fusion. Aussi, l'objectif de cette étape sera de réduire plus les éventuels marqueurs.

Les transformations qui seront appliquées aux images viseront à prendre en compte les aspects topographiques des éléments de ces dernières. Ainsi, nous ne nous intéresserons pas à des transformations ponctuelles telles que l'élimination de telle ou telle texture en fonction de sa taille et de son intensité de niveau de gris, mais l'image sera plutôt regardée globalement, avec pour objectif de réduire au maximum les extrema de la fonction numérique situés sur les surfaces des fragments. Ces derniers sont délimités par les zones d'ombres (vallées du signal).

Pour illustrer les développements qui suivent nous allons considérer des profils verticaux des fonctions à niveau de gris associé aux différentes coupes horizontales de l'image.

2.5.1 Modification de la pente de la fonction distance

La première méthode testée pour la réduction opère par changement de la pente de la fonction distance, que nous avons introduite précédemment. Après pré-filtrage, le seuillage de l'image numérique des fragments fournit une image binaire où les fragments sont l'ensemble binaire à traiter et les zones d'ombres et contours sont le complémentaire (Fig. 2.35 - b).

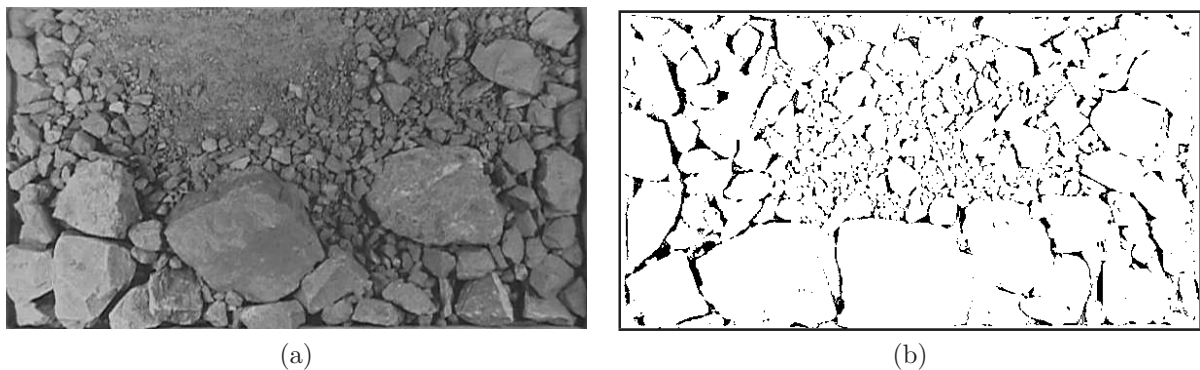


Fig. 2.34: (a) Image initiale, (b) Image seuillée après pré-filtrage

Les marqueurs qui peuvent être considérés sont les maxima de la fonction distance, calculée sur l'image pré-filtrée et seuillée, qui sont effectivement positionnés à l'intérieur des fragments. Cependant, pour ce genre d'images très bruitées, même après pré-filtrage, un seuillage direct s'accompagne souvent de perte d'information au niveau des surfaces des fragments.

Cette perte d'information se manifeste par deux problèmes :

- le premier est dû aux trous dans l'image binaire qui seront considérés comme des frontières lors du calcul de la fonction distance. L'ensemble des contours obtenus par seuillage n'étant pas connectés, le bouchage de trous précédemment introduit n'est pas judicieux pour ce cas.

- Le second est dû au fait que lorsque le contraste n'est pas uniforme sur l'ensemble de l'image, le seuillage tend aussi à grouper les régions de l'image. Ceci se manifeste par un groupement des régions dans l'image binaire et la disparition des contours à l'intérieur de ces zones.

En conséquence, les maxima de la fonction distance associée à de telles images binaires seront selon les cas :

- ou trop nombreux pour réduire la sur-segmentation (Fig. 2.35 - d),
- ou pas assez nombreux au niveau des régions de fines, provoquant ainsi des problèmes de fusion (Fig. 2.36 - d).

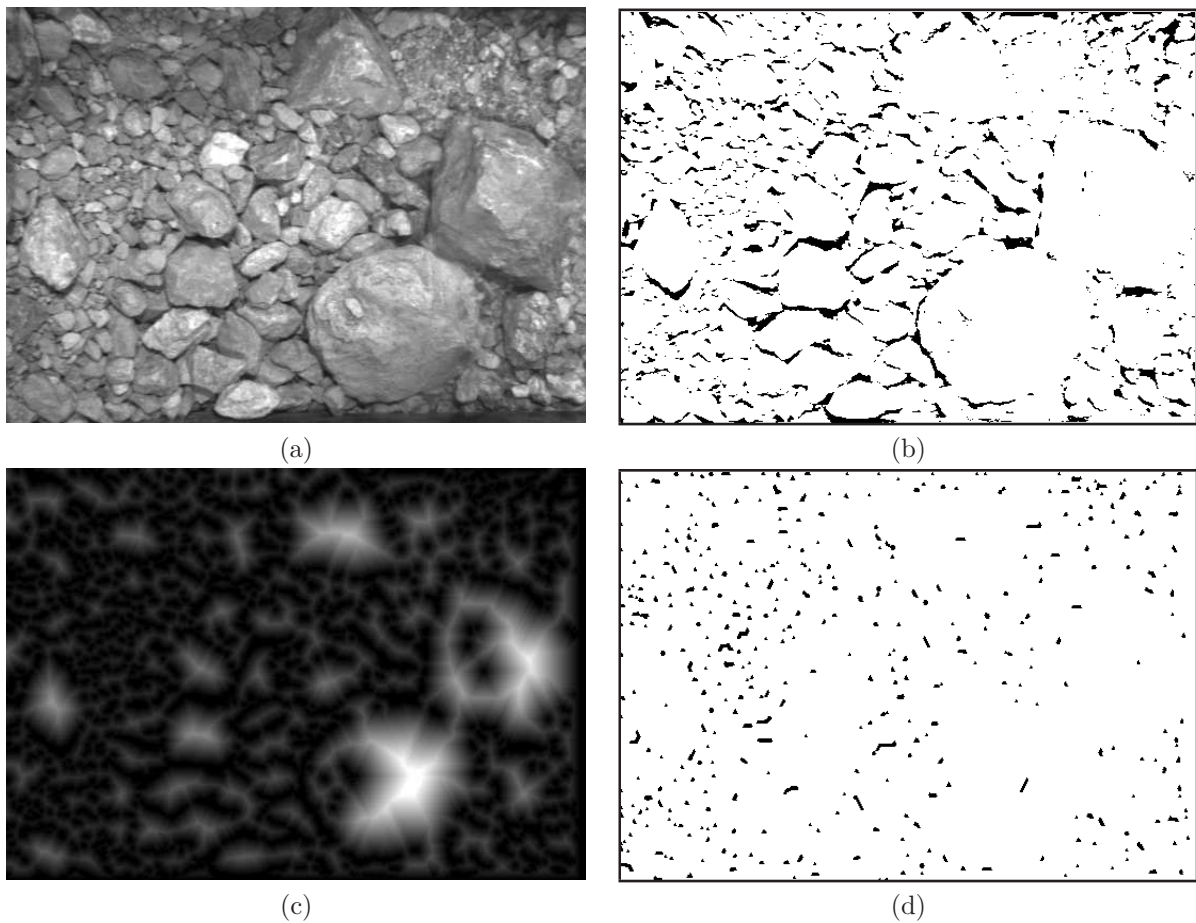


Fig. 2.35: (a) Image initiale, (b) Image seuillée après pré-filtrage, (c) Fonction distance associée, (d) Marqueurs : maxima de la fonction distance

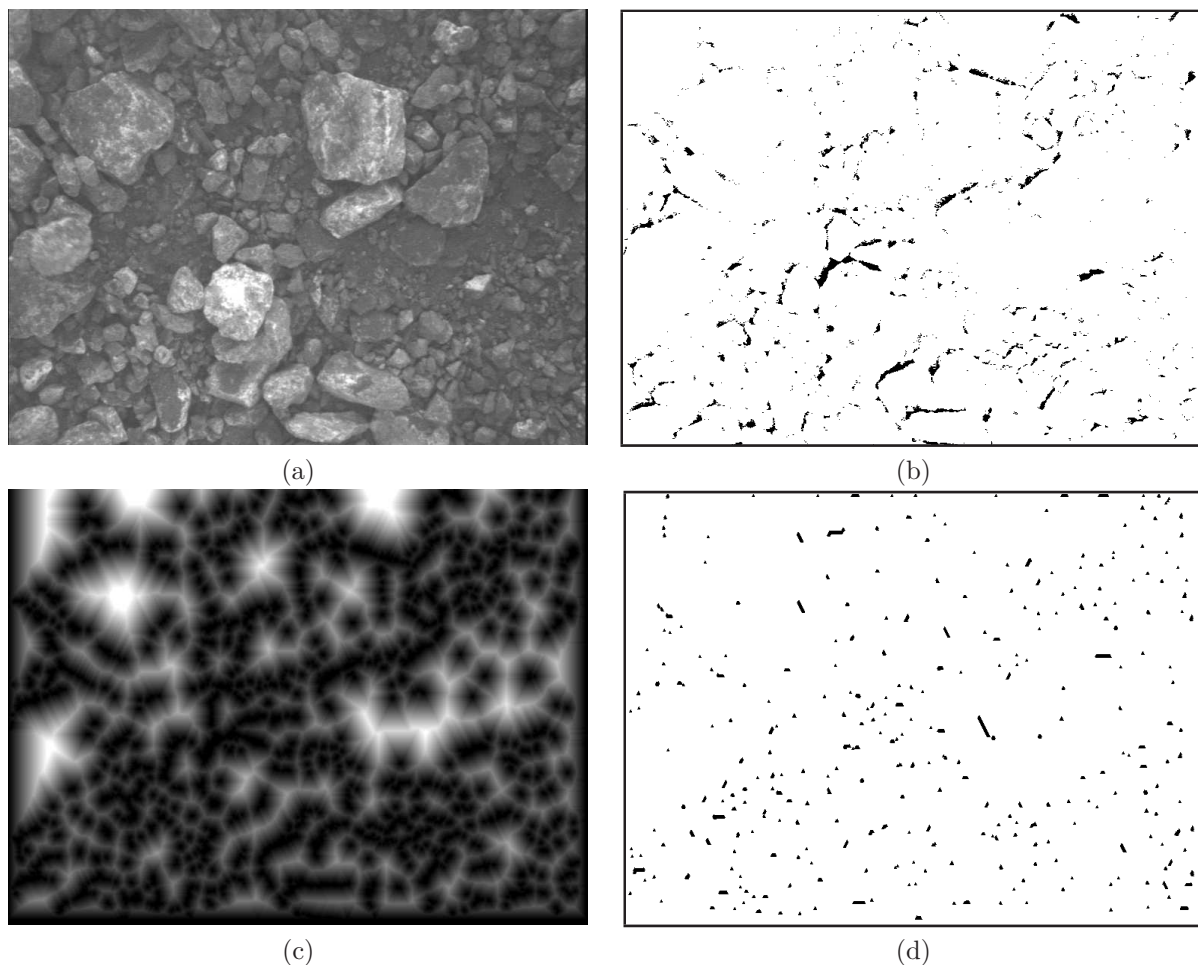


Fig. 2.36: (a) Image initiale, (b) Image seuillée après pré-filtrage, (c) Fonction distance associée, (d) Marqueurs : maxima de la fonction distance

Nouveaux marqueurs

Afin d'éviter ce problème qui accompagne un seuillage direct de l'image pré-filtrée, qu'on notera f , cette dernière sera plutôt écrêtée à un niveau de gris donné. Les maxima qui seront considérés comme marqueurs seront extraits d'une nouvelle fonction distance, notée d' , construite comme suit :

- en premier lieu, une dilatation de taille λ est appliquée à f ,
- puis la fonction résultante est réduite d'une constante μ ,
- le Sup des deux fonctions est ensuite calculé,
- enfin, l'itération de ce processus jusqu'à idempotence permet d'obtenir une fonction distance dont la pente dépend des paramètres λ et μ . Cette idée avait déjà été proposée par S. Beucher [3] dans le cadre de l'étude de la segmentation d'une surface de rupture d'un acier doux.

En termes morphologiques, les différentes opérations appliquées à l'image initiale pré-filtrée f qui permettent de calculer la nouvelle fonction distance d' se traduisent comme suit :

$$d' = \underset{\text{Idempotence}}{\text{Sup}} ((f \oplus \lambda B) - \mu, f) \quad (2.29)$$

où B est le disque unitaire.

Remarque

Généralement le gradient de la fonction distance est égal à 1 partout. Cependant, en faisant varier les paramètres λ et μ , on pourra tenir compte de la taille très variable des fragments (éventuels bassins versants) sur la même image, et ainsi éviter les bruits résiduels dus au seuillage direct.

Étapes de la démarche

Les étapes de la démarche sont illustrées pour l'image de fragments de roches (2.37 - a).

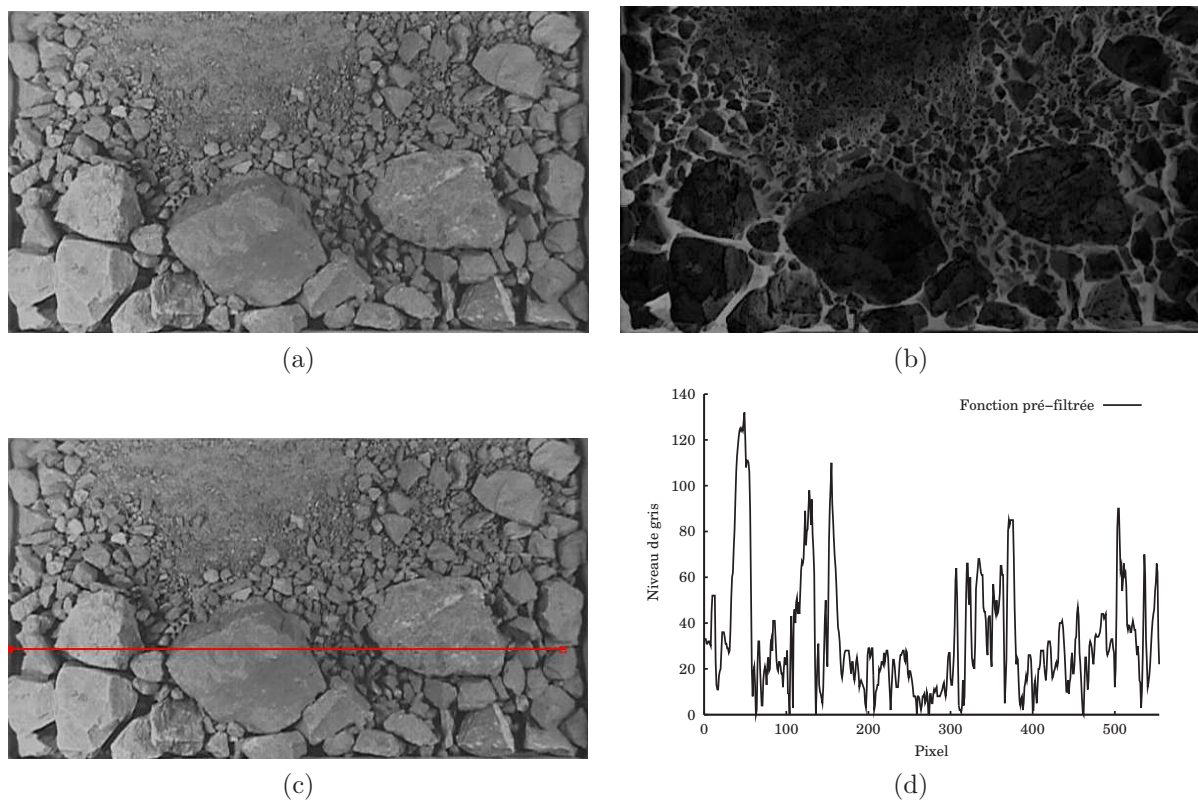


Fig. 2.37: (a) Image initiale, (b) Image pré-filtrée : Sup du gradient et du chapeau haut-de-forme du FAS avec reconstruction de taille 10, (c) Coupe horizontale de l'image initiale, (d) Profil de la fonction de niveau de gris de l'image pré-filtrée

Notons que pour le cas de l'image pré-filtrée (Fig. 2.37 - b), les zones de transition sont caractérisées par les plus hauts niveaux de gris entre lesquels se trouvent les surfaces de fragments. Le bruit dû aux textures résiduelles au pré-filtrage se traduit par l'existence d'un nombre important de pics dans le profil de niveau de gris correspondant aux zones de fragments.

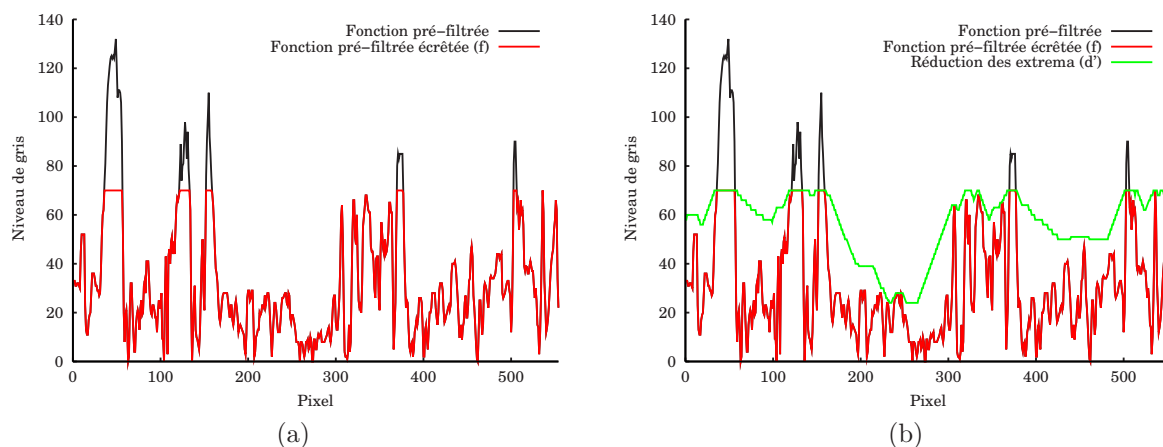


Fig. 2.38: (a) Écrêtage de la fonction pré-filtrée, (b) Réduction des extrema : modification de la pente de la fonction distance

Les figures (2.38-a) et (2.38-b) montrent les profils unidimensionnels pris sur une section donnée de la fonction numérique f et de la fonction distance modifiée d' .

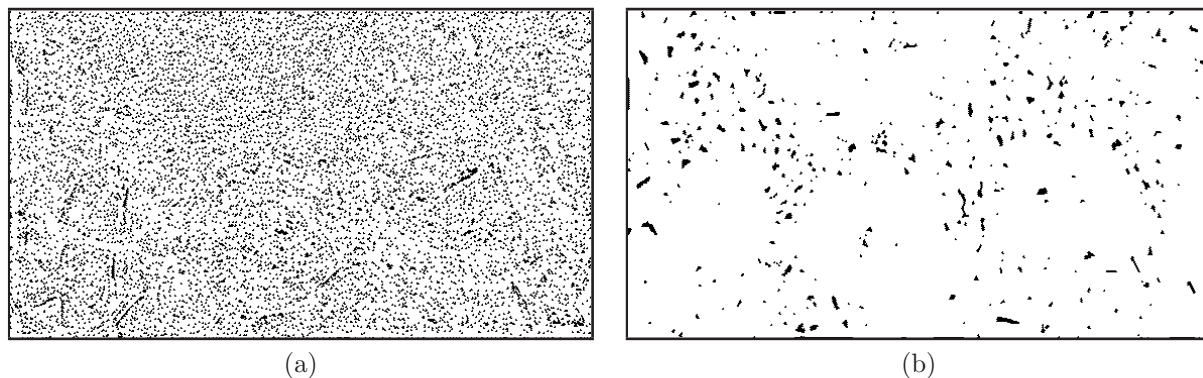


Fig. 2.39: (a) Marqueurs de l'image pré-filtrée avant modification de la pente de sa fonction distance, (b) Marqueurs de l'image pré-filtrée après modification de la pente de sa fonction distance

Après modification de la pente de la fonction distance, les nouveaux marqueurs sont ainsi plus correctement positionnés et sont aussi considérablement réduits comparés à ceux de la fonction pré-filtrée (Fig. 2.39-a et Fig. 2.39-b).

Application à d'autres images de fragments de roche

La pertinence de l'extraction des marqueurs par cette démarche est testée à travers la segmentation d'un ensemble d'images de fragments de roches présentant des conditions de bruit différentes. Les images sur lesquelles les LPE sont tracées sont toujours le Sup du gradient et du chapeau haut-de-forme des images pré-filtrées. Et le pré-filtrage est aussi le même que précédemment : FAS avec reconstruction.

Les premiers tests ont été effectués sur les deux images précédentes (Fig. 2.26-a et 2.26-b).

Nous montrons la séquence des traitements pour la première image (Fig 2.26-a).

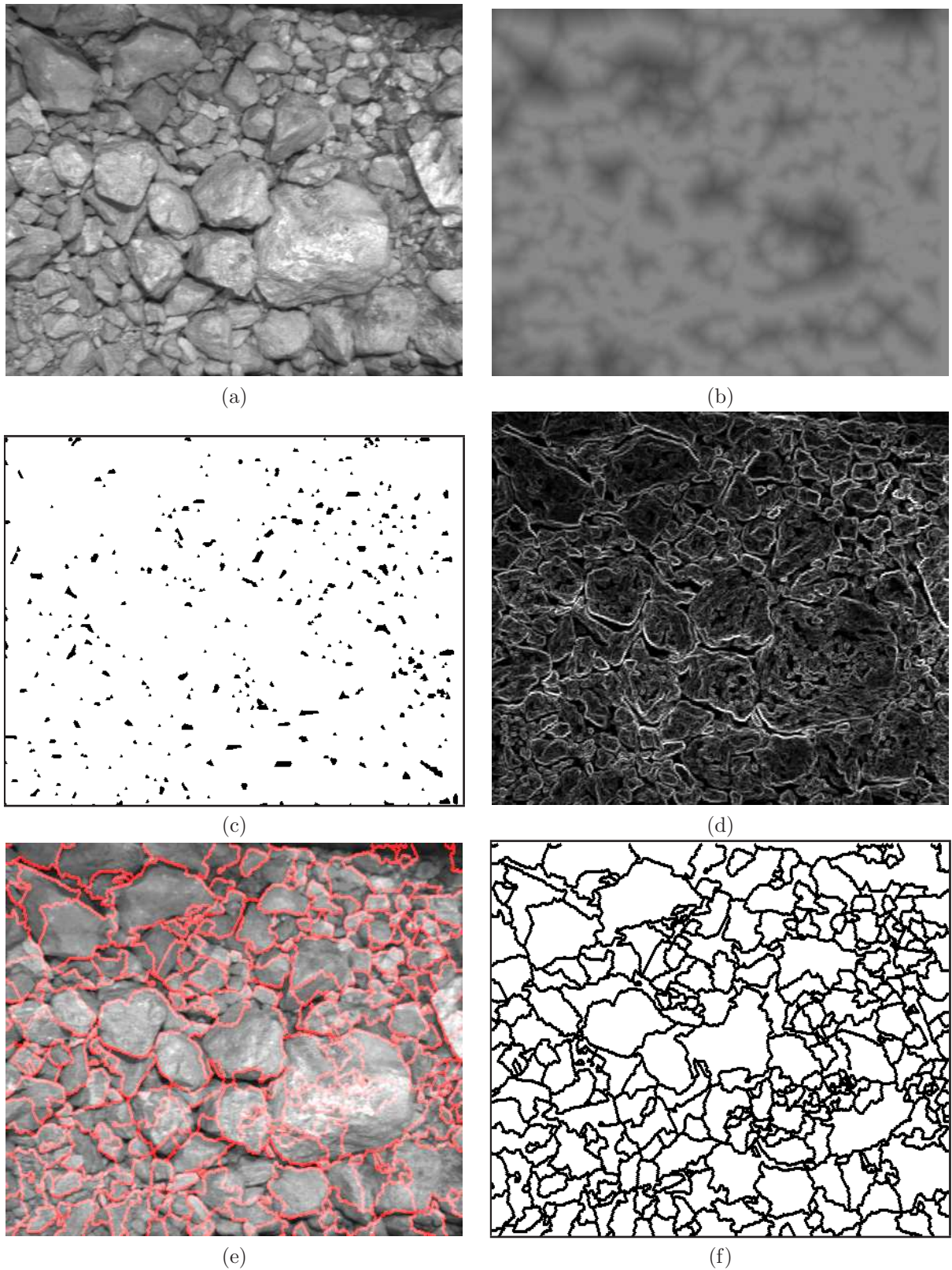


Fig. 2.40: Image 1 : (a) Image initiale, (b) Modification de la pente de la fonction distance ($\lambda = 2$ et $\mu = 2$), (c) Nouveaux marqueurs, (d) Gradient de l'image initiale, (e) Segmentation de l'image par LPE, (f) Image binaire

Comparés à la phase de pré-filtrage, les minima extraits sont encore réduits et les gradients calculés sur le chapeau haut-de-forme filtré donnent des contours assez proches des contours réels. Cependant, à partir d'une certaine taille, les fragments sont sur-segmentés, comme nous pouvons le constater sur l'exemple de la figure (2.41).

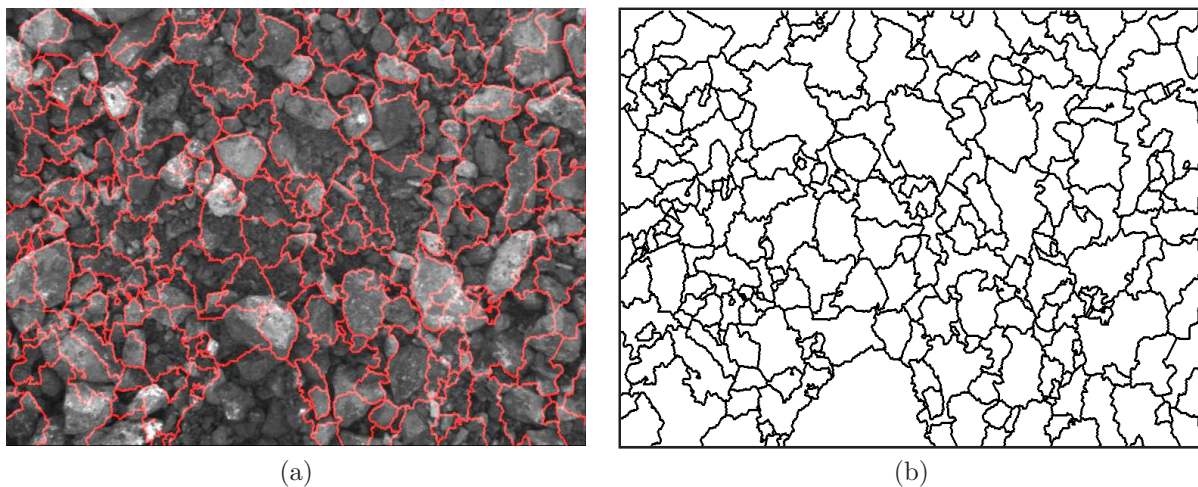


Fig. 2.41: Image 2 : (a) Image initiale, (b) Modification de la pente de la fonction distance ($\lambda = 3$ et $\mu = 1$)

Pour cette deuxième image, les résultats de la segmentation montrent qu'elle est affectée surtout par le phénomène de fusion des zones des fines regroupées.

La même procédure a été appliquée à d'autres images avec différents paramètres λ et μ (Fig. 2.42, 2.43 et 2.44).

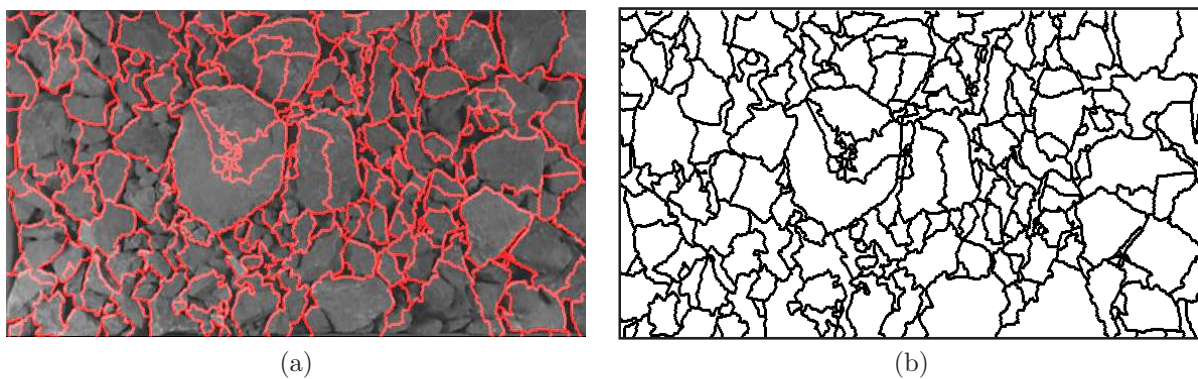


Fig. 2.42: (a) Image initiale, (b) Modification de la pente de la fonction distance ($\lambda = 2$ et $\mu = 2$)

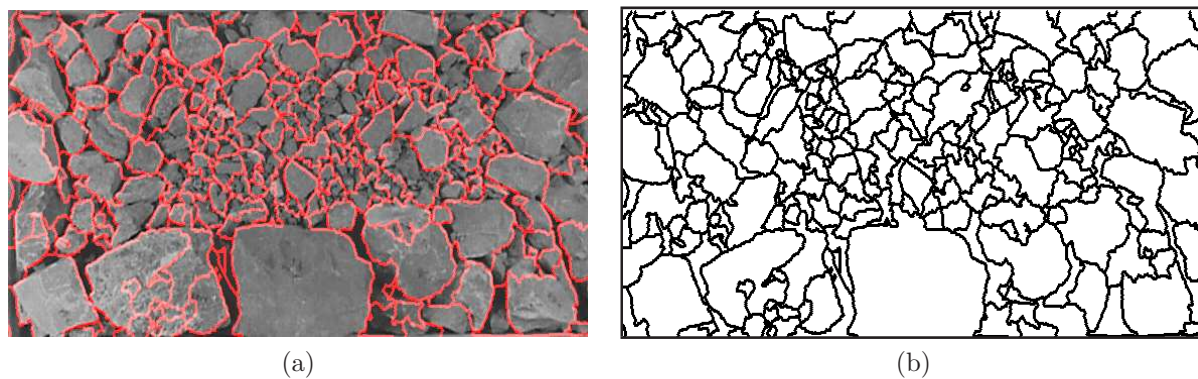


Fig. 2.43: (a) Image initiale, (b) Modification de la pente de la fonction distance ($\lambda = 3$ et $\mu = 2$)

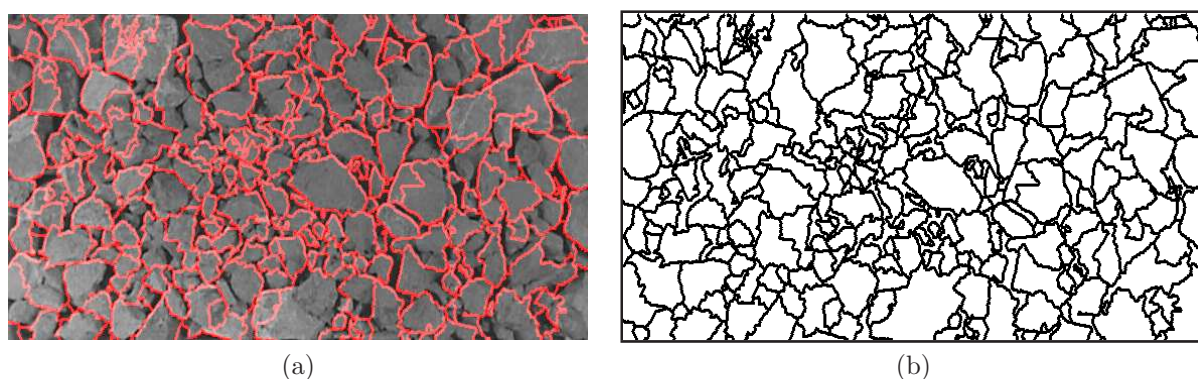


Fig. 2.44: (a) Image initiale, (b) Modification de la pente de la fonction distance ($\lambda = 2$ et $\mu = 3$)

Commentaires

Les résultats montrent que la taille de l'élément structurant et la valeur de la pente choisie influencent les résultats de la segmentation :

- avec une pente moyenne de la fonction distance, les distributions étalées sont affectées par les deux problèmes de fusion des petits fragments et de sur-segmentation des gros. En effet, une pente moyenne s'adapte correctement à la taille moyenne des fragments de l'image mais tend à fusionner les petits fragments lorsqu'ils sont regroupés et n'est pas suffisante pour le filtrage de l'ensemble des textures présentes sur les gros fragments (Fig. 2.42 et 2.43).
- Lorsque la fragmentation est moins étalée, il est tout à fait possible d'ajuster la modification de la pente de la fonction distance sur la taille moyenne (connue au préalable) et de l'appliquer à l'ensemble de l'image. Pour ce cas d'images présentant de bonnes conditions d'acquisition, pratiquement l'ensemble des fragments est correctement segmenté (Fig. 2.44).

Par ailleurs, en ce qui concerne les distributions étalées, les fragments pris individuellement peuvent être filtrés correctement, sauf que pour l'ensemble de l'image la transformation n'étant pas locale, elle ne peut prendre en considération ce genre d'information car ceci revient à connaître auparavant la taille et l'emplacement équivalents des fragments à filtrer. Et ceci est précisément l'information recherchée.

Lorsqu'on analyse le mode opératoire de cette démarche, il peut s'interpréter comme suit.

Le filtrage "croît" depuis les zones de plus haute altitude avec une pente constante vers les régions internes des éventuels bassins versants du relief. Lorsque la surface du fragment n'est pas trop texturée, c'est exclusivement le degré de la pente qui déterminera le degré de la sur-segmentation. D'autre part, si la surface de l'élément est fortement bruitée, ce sont les zones de transition dues à ces bruits qui constituent le départ du processus du filtrage, donnant lieu ainsi à un nombre important de marqueurs qui produisent la sur-segmentation.

La méthode reste donc tributaire de la connaissance de la taille des différents bassins versants (fragments). De plus, lorsqu'il s'agit d'images très bruitées même après pré-filtrage, les textures résiduelles peuvent représenter des zones de transition plus fortes que celles qui existent entre les fragments et les zones d'ombre. Cette éventualité pose problème lors de la construction de la fonction distance après écrêtage.

En effet, ces zones constituent alors des départs de changement de pente de la fonction distance ce qui se traduit par la génération de marqueurs non significatifs. Pour les zones de fines regroupées, elles sont fusionnées car n'ayant pas de zones de transitions entre elles, elles ne sont ainsi pas prises en compte lors du changement de pente.

2.5.2 Synthèse

Les résultats obtenus par la méthode de modification de la pente de la fonction distance nous permettent de faire les constations suivantes :

- la segmentation est améliorée moyennant la réduction des marqueurs par modification de la pente de la fonction distance.
- Cependant, on note qu'il est important de procéder à une réduction de minima qui, en plus de prendre en compte l'aspect topographique des images, soit indépendante de la taille des éléments considérés.

L'amélioration de la réduction des marqueurs sans perte d'information, qui s'accompagne des problèmes de fusion et de sur-segmentation, fera l'objet de la section suivante. La nouvelle démarche est basée sur des transformations morphologiques résiduelles.

2.5.3 Réduction des marqueurs améliorée : Sup des résidus des ouvertures

Dans ce qui suit, nous allons commencer par introduire les transformations résiduelles ainsi que quelques notions topologiques, utilisant elles aussi les mêmes opérateurs de bases introduits précédemment, et qui seront employées pour le filtrage et l'amélioration de l'extraction des marqueurs significatifs.

Nous verrons que lorsque ces transformations seront appliquées à nos images de fragments de roches, elles présenteront globalement deux avantages :

- elles s'adaptent correctement à la structure topographique des images,
- et par leur processus de construction, elles permettent d'éviter le problème rencontré lors de la modification de la pente de la fonction distance, qui est celui de l'utilité de la connaissance préalable de la taille des éléments intéressants à segmenter.

1. Transformations résiduelles

Si on considère deux familles de transformations sur un ensemble X (fragments de l'image binaire après segmentation par exemple), $\psi_\lambda(X)$ et $\zeta_\lambda(X)$ dépendant d'un paramètre de taille $\lambda \geq 0$, l'ensemble résidu de taille λ est donné par la différence ensembliste :

$$r_\lambda(X) = \psi_\lambda(X) \setminus \zeta_\lambda(X), \quad \text{avec } \psi_\lambda \geq \zeta_\lambda \quad (2.30)$$

$$= \psi_\lambda(X) \cap \zeta_\lambda(X)^C \quad (2.31)$$

Sur un intervalle de tailles I ($\lambda \in I$), on associe à l'ensemble X un opérateur résiduel Θ défini par :

$$\Theta = \bigcup_{\lambda \in I} r_\lambda(X) \quad (2.32)$$

$$= \bigcup_{\lambda \in I} (\psi_\lambda(X) \setminus \zeta_\lambda(X)) \quad (2.33)$$

La généralisation aux fonctions numériques s'obtient en faisant l'équivalence entre l'opérateur ensembliste de l'union et l'opérateur numérique de la différence :

$$r_\lambda(f) = \psi_\lambda(f) - \zeta_\lambda(f) \quad (2.34)$$

et

$$\Theta = \sup_{\lambda \in I} (\psi_\lambda(f) - \zeta_\lambda(f)) \quad (2.35)$$

Fonction associée

En général, on associe à r_λ et Θ une autre fonction résiduelle q , dite fonction associée, ayant pour support Θ , et prenant pour valeur en chaque point $x \in \Theta$ la valeur de l'indice du résidu r_λ augmentée de 1. Ainsi :

$$\forall x \in r_\lambda, \quad q(x) = \lambda + 1 \quad (2.36)$$

Pour ce qui concerne la généralisation au cas numérique, il faut prendre en compte le fait que deux résidus de tailles différentes puissent avoir un support commun. La fonction associée q est alors définie par :

$$\text{Pour tout } x \in r_\lambda, \quad q(x) = \arg \max_{\lambda \in I} (\max(\lambda) + 1) \quad (2.37)$$

$$= \arg \max_{\lambda \in I} \left(\max_{\lambda \in I} (\psi_\lambda(f) - \zeta_\lambda(f)) + 1 \right) \quad (2.38)$$

Ouverture ultime : Sup des résidus des ouvertures

Lorsqu'on prend comme transformations ψ et ζ respectivement deux ouvertures par des boules de taille λ et $\lambda + 1$, on définit la transformée ν appelée *ouverture ultime* (Beucher, 2003) [4] :

$$\nu = \sup_{\lambda \in I} (\gamma_\lambda(f) - \gamma_{\lambda+1}(f)) \quad (2.39)$$

Cet opérateur est d'un grand intérêt lorsqu'il s'agit du cas numérique. En effet, calculée sur une image numérique, l'ouverture ultime représente l'union de tous les plus grands et plus hauts cylindres, nommés *cylindres significatifs*, pouvant être inclus dans le sous-graphe de la fonction représentant l'image initiale.

Fonction granulométrique

Toujours en numérique, la fonction associée à l'ouverture ultime ν correspond au rayon du plus grand cylindre significatif qui recouvre chaque point x .

La fonction associée, qu'on notera ξ , est nommée *fonction granulométrique*. Elle est définie comme suit :

$$\xi(f) = \arg \max_{\lambda \in I} \left(\max_{\lambda \in I} (\gamma_\lambda(f) - \gamma_{\lambda+1}(f)) + 1 \right) \quad (2.40)$$

2. Boule maximale

Une boule $B_{\lambda,x}$ de taille λ et de centre x est maximale par rapport à un ensemble X , s'il n'existe aucune autre boule $B_{\tau,y}$ (de taille τ et de centre y donnés) appartenant à X telle que :

$$B_{\lambda,x} \subseteq B_{\tau,y} \subseteq X, \quad \tau > \lambda \quad (2.41)$$

Une boule maximale est ainsi définie comme étant une boule qui n'est contenue dans aucune autre boule de X .

Squelette par boules maximales

Le squelette par boules maximales d'un ensemble X suivant une famille de boules B_λ est défini comme étant le lieu géométrique des centres des boules maximales incluses dans X .

En utilisant les opérateurs résiduels introduits ci-dessus, le squelette par boules maximales est précisément la transformée Θ associée aux deux transformations ψ et ζ telles que :

- ψ_λ est une érosion de taille $\lambda : \epsilon_\lambda$,
- ζ_λ est son ouverture élémentaire : $\zeta_\lambda = \gamma(\epsilon_\lambda)$.

avec λ parcourant tout l'intervalle des tailles des érosions jusqu'à la plus grande taille qui élimine entièrement l'ensemble en question.

En binaire, l'une des propriétés des boules maximales est qu'elles permettent de reconstruire entièrement l'ensemble X . En effet, il suffit de dilater chaque point du squelette par un disque de même taille de la boule dont il est le centre.

Cette information est contenue dans l'ensemble $\Theta(X)$ et sa fonction associée, nous avons donc :

$$X = \bigcup_{x \in X} (\Theta(x) \oplus B_{x,q(x)}) \quad (2.42)$$

En numérique, la reconstruction ne peut être que partielle, et ce, pour les mêmes raisons évoquées auparavant par rapport à la définition de la fonction associée dans le cas numérique.

En chaque point du nouvel ensemble reconstruit, noté ρ , est implanté un cylindre de rayon égal à la valeur de la fonction associée en ce point, et de hauteur égale à la valeur du résidu au même point :

$$\rho(f) = \sup_{x \in f} (\Theta(x) \oplus B_{x,q(x)}) \quad (2.43)$$

Boule maximale critique

Pour les deux cas binaire et numérique, la reconstruction de l'ensemble initial moyennant les boules maximales est souvent accompagnée de redondance à cause du nombre important des boules maximales calculées. En effet, certaines boules maximales ne sont pas utiles lors de la reconstruction car à un certain moment elles seront recouvertes par des **combinaisons d'autres boules maximales** de l'ensemble initial.

Le sous-ensemble des boules maximales qui ne peuvent être recouvertes par aucune combinaison d'autres boules maximales est ainsi suffisant à la reconstruction sans redondance de l'ensemble initial. Les boules maximales appartenant à ce sous-ensemble sont nommées *boules maximales critiques*. Plus loin nous verrons que, par leur définition, les boules critiques présentent d'intéressantes propriétés de filtrage.

Par ailleurs, il est essentiel de noter que la notion de boules critiques est plus difficile à manipuler avec des éléments polygonaux définis par la trame utilisée dans le cadre d'espaces digitaux, comparées au cas des ensembles dans \mathbb{R}^n . Cependant, pour ce qui est de notre objectif, l'adaptation de cette notion au cas du traitement d'images est tout à fait suffisante par rapport aux applications que nous allons utiliser. Pour une lecture plus large sur cette adaptation, le lecteur intéressé pourra se référer aux travaux de Beucher sur le sujet [4].

Algorithme de calcul des boules maximales critiques

Concernant la détermination des boules maximales critiques, il faut noter que la fonction associée à l'ouvert ultime constitue une première phase de calcul. En effet, les boules maximales (ou les portions de boules maximales) qui apparaissent sur la fonction associée sont par définition les boules maximales non recouvertes par la combinaison d'autres boules maximales de tailles plus grandes. La deuxième phase de calcul consiste à ne garder que les boules maximales de la fonction associée qui ne sont pas recouvertes par la combinaison de boules de taille plus petite. L'algorithme de calcul des boules critiques est détaillé dans (Beucher, [4]).

Remarque

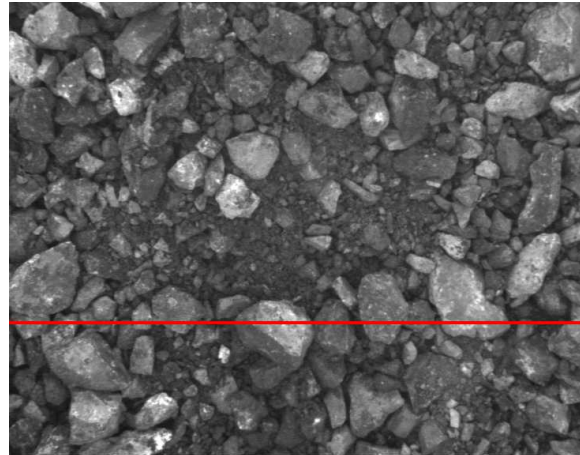
Calculées sur un ensemble d'éléments disjoints, les boules maximales (plus précisément la plus grande des boules maximales pour chaque élément) ont la propriété de fournir une information granulométrique lorsqu'elles représentent chaque élément significatif de l'image (fragment par exemple). De plus, étant donné que ces boules maximales sont inscrites à l'intérieur de chaque élément, elles constitueront de très bons marqueurs pour une segmentation par LPE contrôlée.

Cependant, les problèmes liés au bruit qu'on a rencontrés au niveau du filtrage ne permettent pas de les extraire correctement. Ainsi, l'objectif poursuivi lors de cette dernière partie du chapitre est effectivement d'améliorer leur extraction. Les filtrages qui précéderont l'extraction seront effectués moyennant les opérateurs résiduels numériques que nous avons introduits ci-dessus.

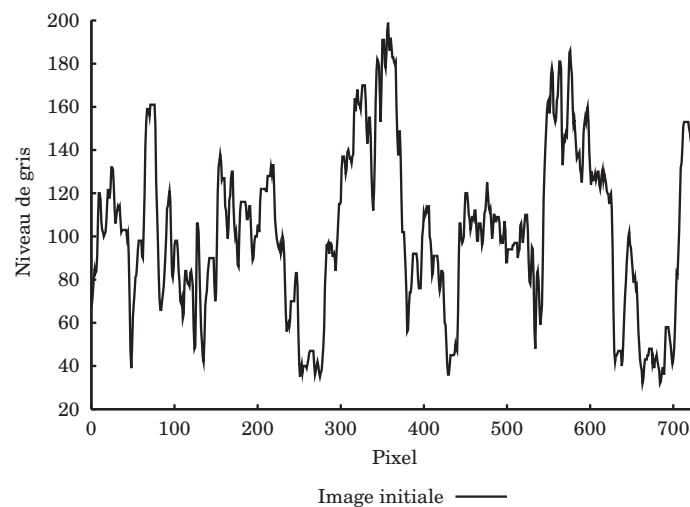
3. Filtrage

Topographiquement, et en utilisant la notion du sous-graphe de la fonction numérique associé à une coupe horizontale, l'image à niveaux de gris des fragments de roches peut s'interpréter comme suit :

- les fragments de roches apparaissent comme les dômes (ou montagnes) correspondant aux hautes altitudes du relief,
- les zones d'ombres représentent les vallées entre ces dômes (Fig. 2.45 - b).



(a)



(b)

Fig. 2.45: (a) Image initiale, (b) Sous-graphe correspondant au profil

Lorsqu'on analyse de près les dômes qui correspondent aux fragments, on peut noter qu'ils représentent un terrain plus ou moins accidenté, et ce, selon le degré des textures sombres et claires qui existent sur leurs surfaces.

Localement les textures peuvent s'interpréter de la même manière que précédemment, où les textures claires seront de nouveaux dômes et les textures sombres les nouvelles vallées entre ces derniers.

L'information qui permet de différencier entre ces différentes structures de l'image (les fragments et les textures claires notamment) dans l'ensemble du relief topographique est essentiellement leur **“hauteur relative”**. Comme illustré par la figure (2.46), elle se traduit aussi numériquement par des **“niveaux de gris relatifs”** respectivement entre :

- la surface du fragment et la zone d'ombre mitoyenne : **niveau de gris relatif des fragments**, noté N_F ,
- entre la texture claire et la surface du fragment sur laquelle la texture existe : **niveau de gris relatif des textures claires** (N_{Tc}),
- et entre la texture sombre et la surface du fragment **niveau de gris relatif des textures sombres** (N_{Ts}),
- à ces structures, nous pouvons en ajouter une dernière qui représente le niveau de gris relatif entre les zones d'ombres et un éventuel fond de l'image (N_z).

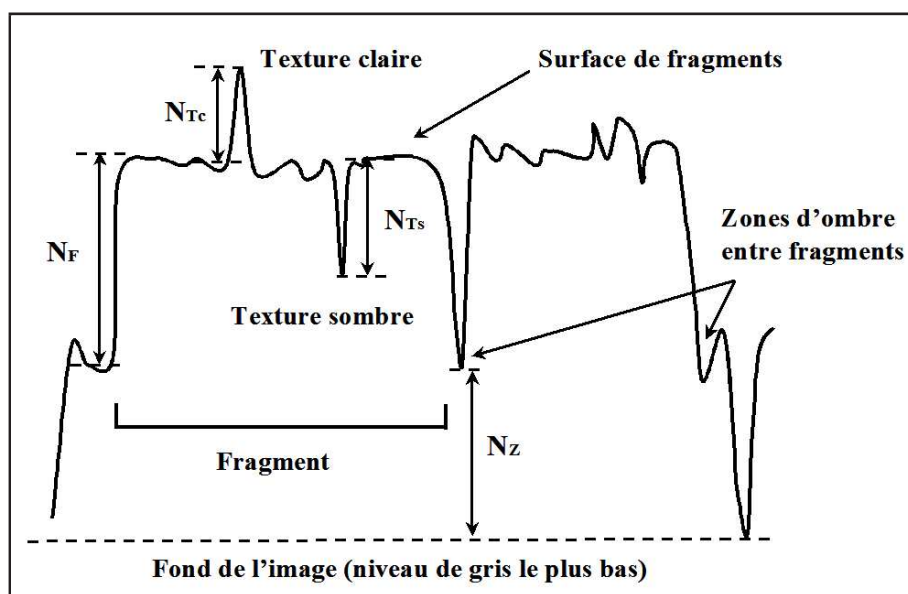


Fig. 2.46: Niveaux de gris relatifs des différentes structures de l'image de fragments de roches

Rappelons que le critère de séparation sur lequel se base la détection des fragments est celui du contraste entre ces derniers et les zones d'ombre qui les entourent. En effet, lorsque les images étudiées sont convenablement contrastées, cela se traduit par un “niveau de gris relatif des fragments” globalement plus grand que celui des autres structures de l'image, (plus particulièrement celui des textures).

Cette caractéristique sera utilisée pour le **filtrage des textures** moyennant la construction de l'ouvert ultime de l'image initiale, qui par sa construction compare les différents niveaux de gris relatifs des structures de l'image.

Pour juger les résultats du filtrage par les transformations résiduelles, la fonction granulométrique associée à l'ouvert ultime sera utilisée pour l'extraction des nouveaux marqueurs. La procédure suivie est explicitée et discutée ci-dessous.

Calcul de l'ouvert ultime et de la fonction granulométrique

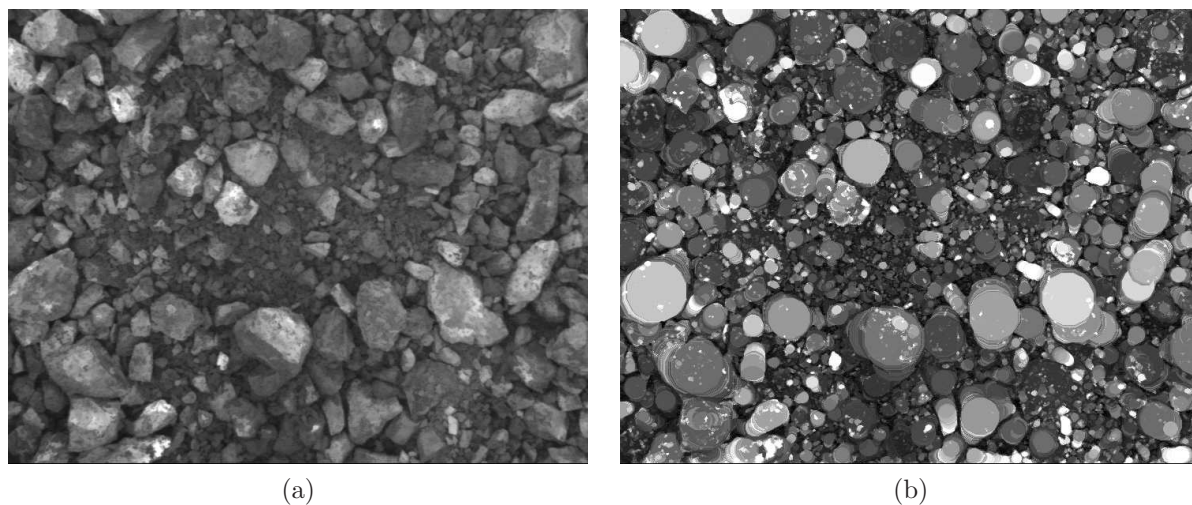
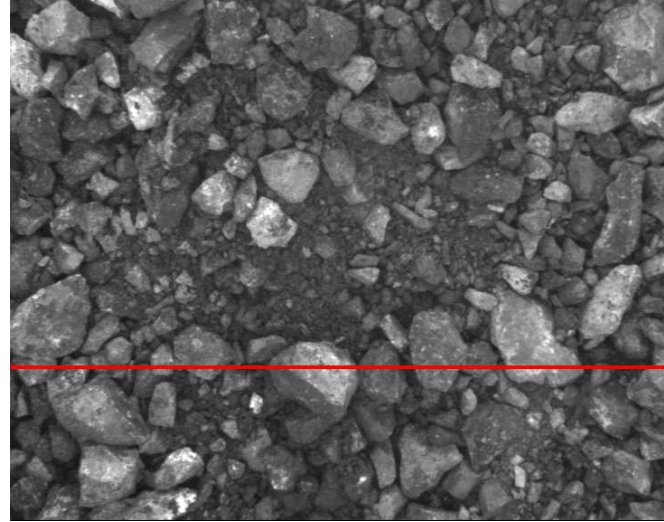


Fig. 2.47: (a) Image initiale pré-filtrée par FAS de taille 3 avec reconstruction (f), (b) Ouvert ultime (ouvertures isotropes de taille maximale 60) : $\nu(f)$

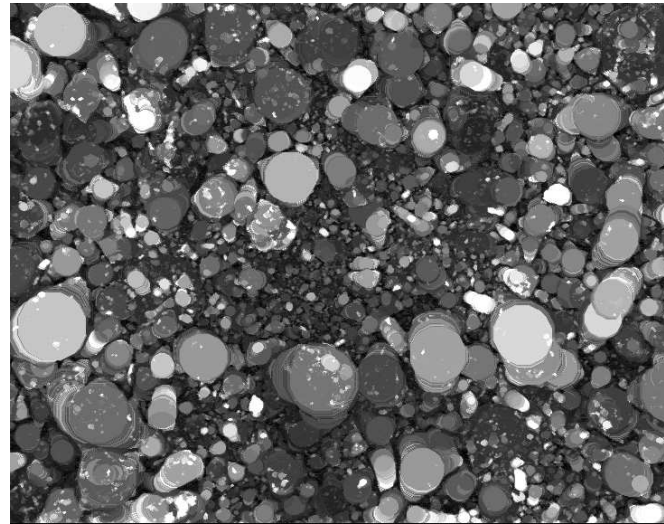
Le calcul de l'ouvert ultime de l'image initiale (pré-filtrée par un FAS avec reconstruction), avec comme taille maximale 60 pour les ouvertures (Fig. 2.47), montre les points suivants :

- l'ensemble des dômes qui correspondent aux plus grands niveaux de gris relatifs sont préservés. Les surfaces des fragments correspondent dans l'ouvert ultime à des disques empilés les uns sur les autres (ou boules maximales empilées). Par définition, chaque disque (ou portion de disque) correspond au sommet du cylindre le plus significatif qui recouvre les pixels qui le forment,
- une partie considérable des structures qui correspondaient aux textures a été filtrée. En effet, leurs niveaux de gris relatifs étant inférieurs à ceux des fragments, ils n'apparaissent pas sur le Sup.

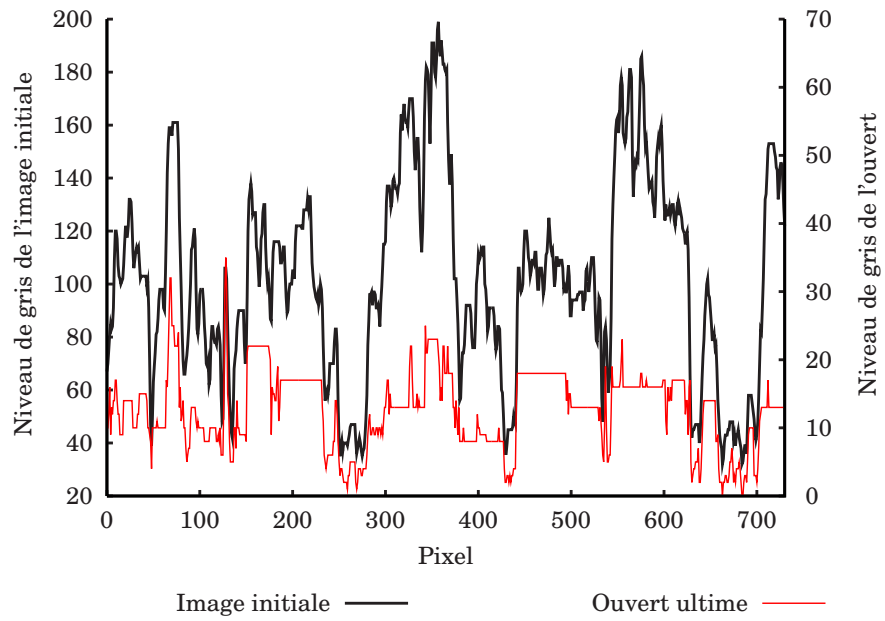
La comparaison des deux sous-graphes des fonctions numériques associées à l'image initiale et son ouvert ultime de taille 60 illustre aussi l'apport du filtrage (Fig. 2.48).



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.48: (a) Image initiale pré-filtrée (f), (b) Ouvert ultime $\nu(f)$, (c) Sous-graphes de l'image initiale et de son ouvert ultime

Remarque

A ce niveau, nous serions tentés de calculer directement la fonction granulométrique associée à l'ouvert ultime à partir de laquelle nous pouvons extraire la boule maximale inscrite à l'intérieur de chaque fragment, que nous appellerons **boule maximale pertinente** (Fig. (2.49)-c). Nous définissons cette dernière comme étant la plus grande des boules maximales empilées qui forment le fragment en question.

Pour ce faire, l'algorithme de tri consistera à opérer sur chaque seuil de niveau de gris g , de la fonction granulométrique ξ , une ouverture de taille $(g - 1)$. Ceci permettra de ne garder pour chaque fragment que la plus grande des boules maximales qui le forment (de taille g) ; éliminant ainsi les portions des autres (Fig. (2.50)-a). Rappelons que par définition, le niveau de gris de chaque boule maximale dans la fonction granulométrique correspond à sa taille.

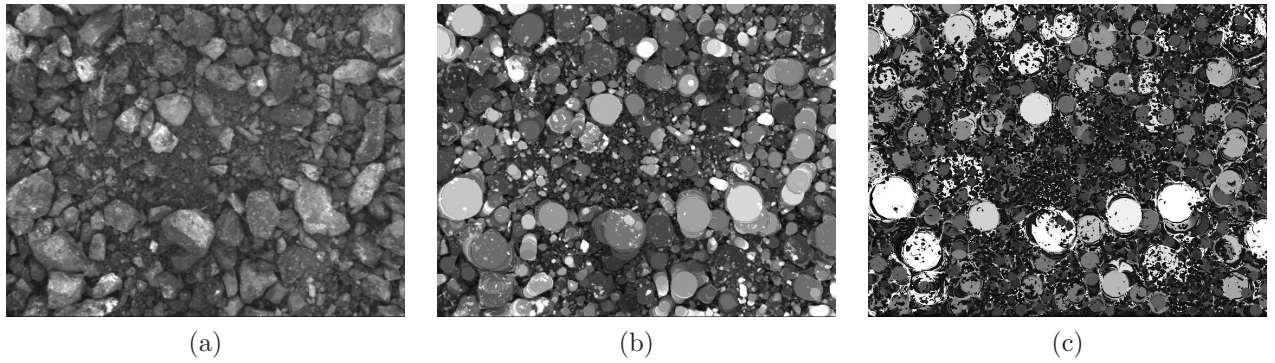


Fig. 2.49: (a) Image initiale (f), (b) Ouvert ultime : $\nu(f)$, (c) Fonction granulométrique associée : $\xi(f)$

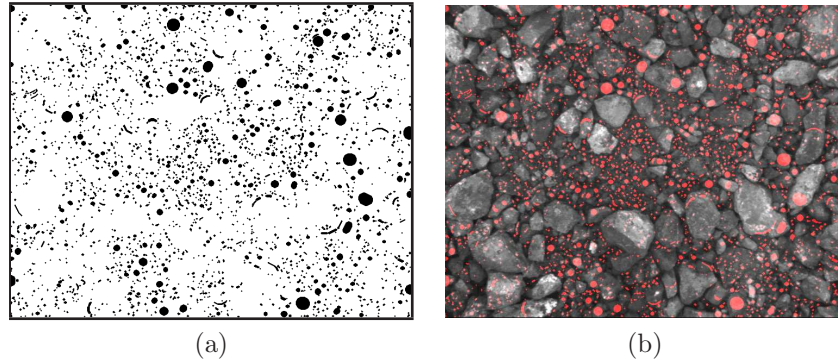


Fig. 2.50: (a) Image binaire, (b) Boules maximales extraites superposées à l'image initiale

Cependant, pour pouvoir extraire correctement les boules maximales pertinentes, deux problèmes doivent être résolus.

1. **Idempotence** : le premier est celui de la convergence de l'opération du Sup. En effet, pour l'illustration, lors du calcul de l'ouvert ultime, nous avons fixé une taille maximale

de 60 pour les ouvertures (taille légèrement supérieure à celle qui élimine le plus grand fragment présent à l'image), et ce, pour deux raisons :

- d'une part afin d'éviter que les structures, qui correspondent à des zones d'ombre ayant un niveau de gris relatif N_z plus grand que celui des fragments N_F (plus précisément lorsque $N_z > N_F - N_{Ts}$), ne viennent se placer dans le Sup. Lorsque c'est le cas, tout se passe comme si les fragments jouaient le rôle de textures claires positionnées sur de grandes structures représentées par les zones d'ombres (Fig. 2.51).



Fig. 2.51: “Niveau de gris relatif” des zones d'ombre plus grand que celui des fragments ($N_z > N_F$)

- D'autre part, même lorsque le problème précédent ne se présente pas, le choix d'une taille maximale permet d'éviter un temps de calcul énorme nécessaire à la convergence. En effet, l'idempotence n'est pas obtenue tant que la taille de la plus grande structure de l'image n'est pas atteinte.

On peut noter par ailleurs que, comparé au problème précédent rencontré lors de la modification de la pente de la fonction distance qui consistait à définir préalablement les tailles des bassins versants, le problème présent est moindre dans la mesure où il s'agit de définir une seule taille pour l'ensemble de l'image. Cependant, cela reste problématique par rapport à une éventuelle automatisation de l'extraction qui ne peut être correctement envisageable, si l'on doit choisir une taille maximale pour chaque image traitée.

La résolution de ce premier problème lié à l'idempotence fera l'objet de la section suivante. Comme le montreront les développements qui vont suivre, la fixation d'une taille maximale pour le calcul du Sup des résidus, n'interférera en rien avec l'objectif de **filtrage** poursuivi dans cette section.

Dans ce qui suit, l'ouvert ultime sera noté avec l'indice de taille maximale τ , cette dernière étant la borne supérieure de l'intervalle des tailles λ .

$$\nu_\tau = \sup_{\lambda \in [0, \tau]} (\gamma_\lambda(f) - \gamma_{\lambda+1}(f)) \quad (2.44)$$

2. Bruits résiduels : le second problème provient de l'ouvert ultime qui reste assez bruité (Fig 2.48-b). En effet, comme l'illustrent les profils (Fig. 2.48-c), quelques textures claires restent après filtrage. Elles se présentent comme des pics positifs sur la surface quasi-plate des fragments. Elles se manifestent aussi au niveau de la fonction granulométrique par des points sombres à l'intérieur des régions des fragments (Fig. 2.49-c).

Évidemment, la raison de l'implantation des ces structures dans le Sup s'explique par le fait que leur "niveau de gris relatif" est plus grand que celui des fragments en question diminué de celui des textures sombres ($N_{Tc} > N_F - N_{Ts}$).

Par ailleurs, lorsque les textures sombres ont aussi un "niveau de gris relatif" plus grand que celui du fragment (ou plus précisément $N_{Ts} > N_F - N_{Ts}$), elles sont considérées comme des zones d'ombres lors de la construction de l'ouvert ultime. Le fragment en question est ainsi divisé en un ensemble de petits fragments dans la fonction granulométrique.

La présence de ces deux types de textures explique la perte d'un grand nombre de boules maximales pertinentes constatée lors de l'extraction de ces dernières par l'algorithme de tri précédemment décrit (Fig 2.50-a).

Résolution du problème lié aux textures claires

Pour remédier au problème, nous utilisons encore une fois les caractéristiques topographiques des structures en question. La solution passe par l'évaluation des apports de deux démarches :

1. Dans la fonction granulométrique, pour chaque seuil affecté par le bruit résiduel, les textures claires apparaissent comme des trous positionnés à l'intérieur des fragments dans l'image binaire (Fig. 2.52-b). En principe, la transformation de bouchage de trous, introduite précédemment, effectuée sur la fonction granulométrique ξ permettra de boucher les trous avant application de l'algorithme de tri sur chaque seuil (Fig. 2.52-c). Appliqué à la fonction granulométrique, le bouchage des trous donne lieu à de nouvelles boules maximales (Fig. 2.53-b)

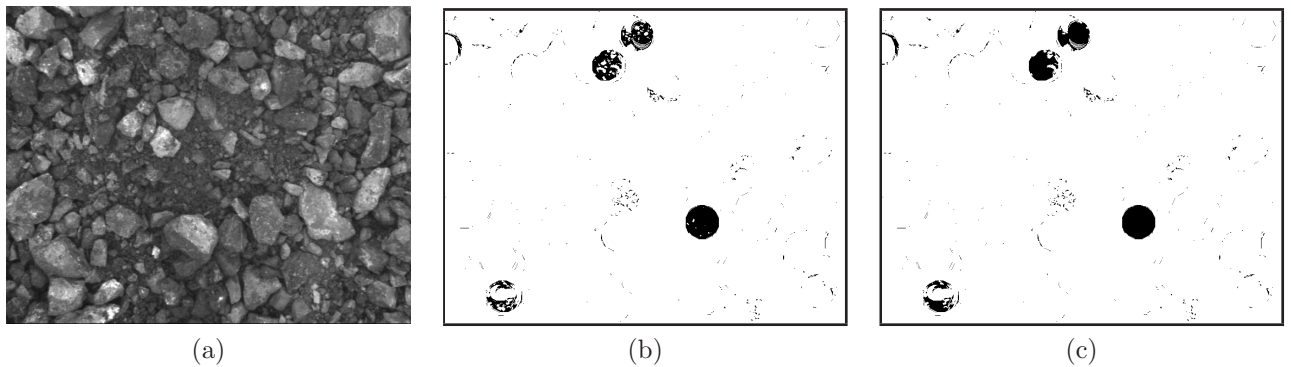


Fig. 2.52: (a) Image initiale, (b) Boules maximales extraites de la fonction granulométriques pour le seuil $g = 30$, (c) Boules maximales après bouchage de trous (seule la boule située en bas à droite est conservée après ouverture de taille $g - 1 = 29$)

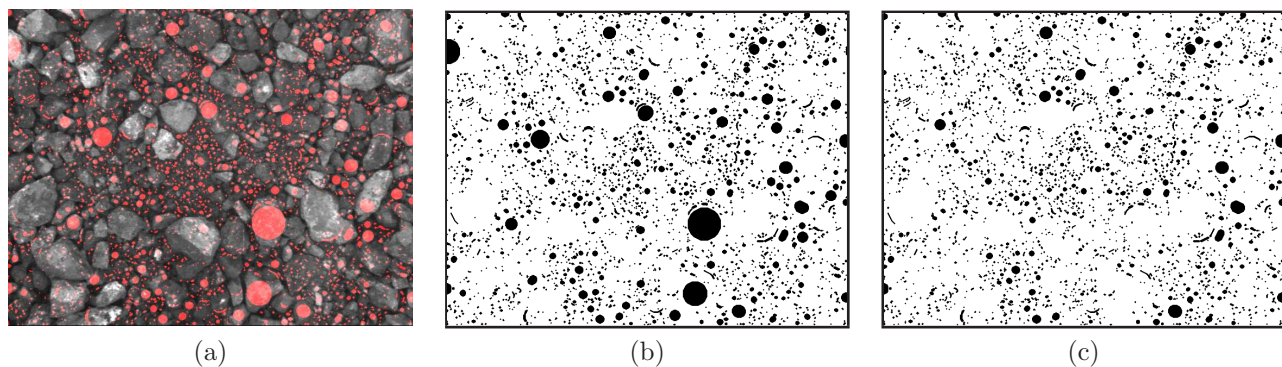


Fig. 2.53: (a) Nouvelles boules maximales extraites superposées à l'image initiale, (b) Image binaire associée, (c) Image binaire des boules maximales précédentes

Le filtrage est amélioré après bouchage des trous. Il reste toutefois insuffisant car une partie importante de boules a été éliminée par l'algorithme de tri. En effet, les "trous" dus à certaines textures, se positionnant sur les bords des fragments, ne sont pas bouchés. Dans le seuil équivalent, ils ne sont pas considérés ainsi (Fig. 2.54-b et 2.54-d). Par conséquent, ayant une taille théorique g (puisque présentes sur le seuil équivalent), elles sont toutefois éliminées par une ouverture de taille $g - 1$ (Fig. 2.54).

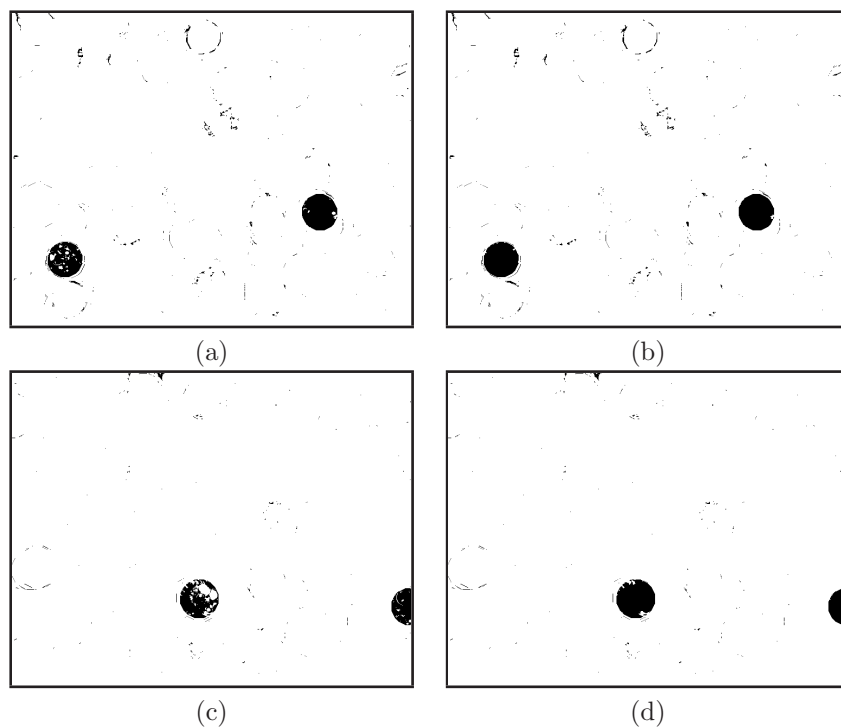


Fig. 2.54: (a) Boules maximales avec des trous situés sur le bord (seuil $g = 32$), (b) Boules précédentes après bouchage de trous (perdues après ouverture de taille $g - 1 = 31$), (c) Boules maximales avec des trous situés sur le bord (seuil $g = 35$), (d) Boules précédentes après bouchage de trous (perdues après ouverture de taille $g - 1 = 34$)

Il en découle que le bouchage de trous effectué à ce stade final de la construction (au niveau de la fonction granulométrique ξ notamment), ne résout pas pleinement le problème.

2. Pour éviter que l'information contenue dans l'ouvert ultime ν , qui engendre la fonction granulométrique ξ , soit altérée par les textures claires au moment de la construction, il nous faut agir à un stade plus en amont, celui de l'image pré-filtrée notamment. En effet, sur l'image inverse correspondante à cette dernière, les textures claires apparaissent aussi comme des trous, mais cette fois-ci, dans le relief topographique (Fig. 2.55).

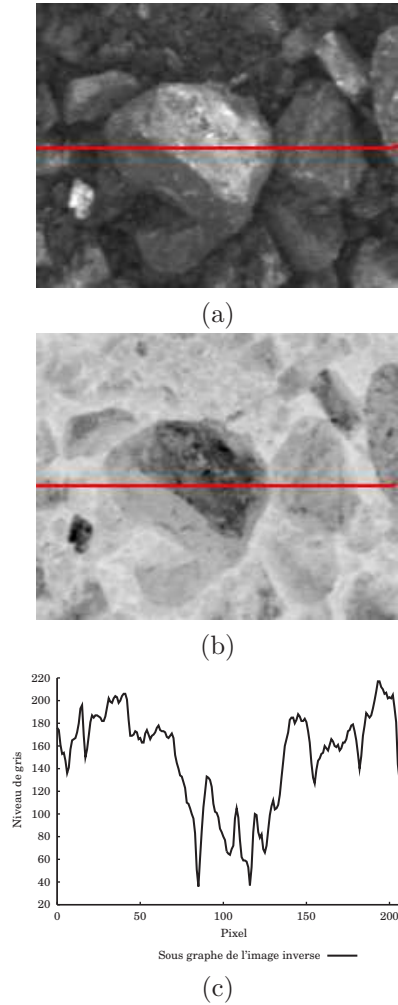


Fig. 2.55: (a) Fragment avec textures claires, (b) Image inverse, (c) Sous-graphe de l'image inverse montrant les textures claires sous forme de “trous” dans le relief

En conséquence, un bouchage des trous de l'inverse de l'image pré-filtrée permettra d'éviter au maximum le positionnement dans l'ouvert ultime des textures claires qui pourraient avoir un “niveau de gris relatif” plus grand que celui des fragments (Fig. (2.56)-b et 2.56)-c). La fonction granulométrique résultante montre qu'une partie considérable des textures claires a été éliminée (Fig. (2.56)-d)).

L'application du même algorithme d'extraction des boules maximales permet de comparer les nouvelles boules maximales avec celles extraites précédemment (Fig. (2.56)-e et (2.56)-f).

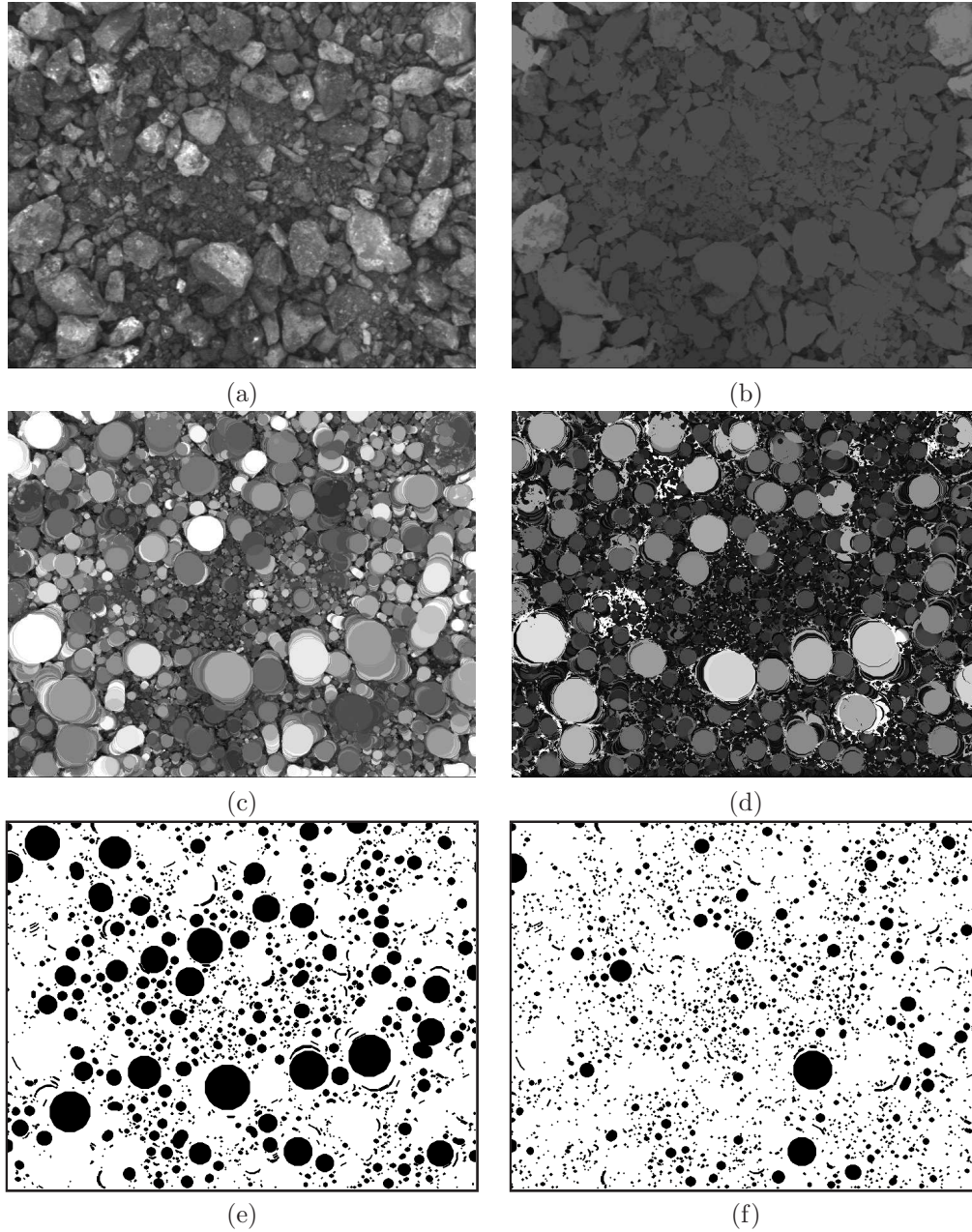


Fig. 2.56: (a) Image initiale pré-filtrée (f), (b) Image initiale après pré-filtrage et bouchage de trous (f'), (c) Ouvert ultime associé $\nu(f')$, (d) Fonction granulométrique associée à $\nu(f')$, (e) Boules maximales extraites pour $\nu(f')$, (f) Boules maximales extraites pour $\nu(f)$

La comparaison des profils successivement de la fonction initiale pré-filtrée f , de ν calculée directement sur f et celui de ν calculée sur f après bouchage de trous permet de constater la réduction considérable du bruit (Fig. 2.58).

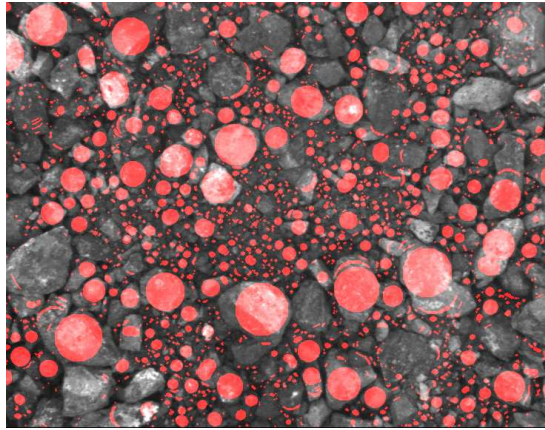
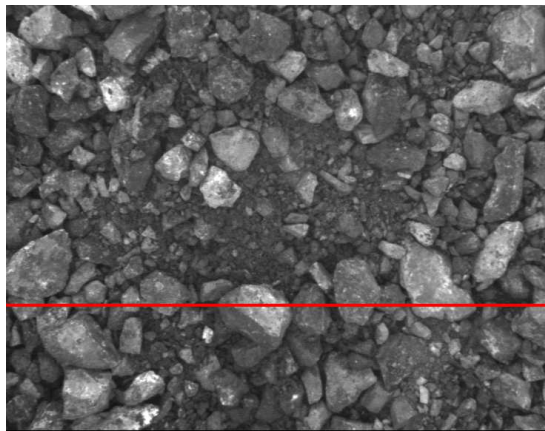
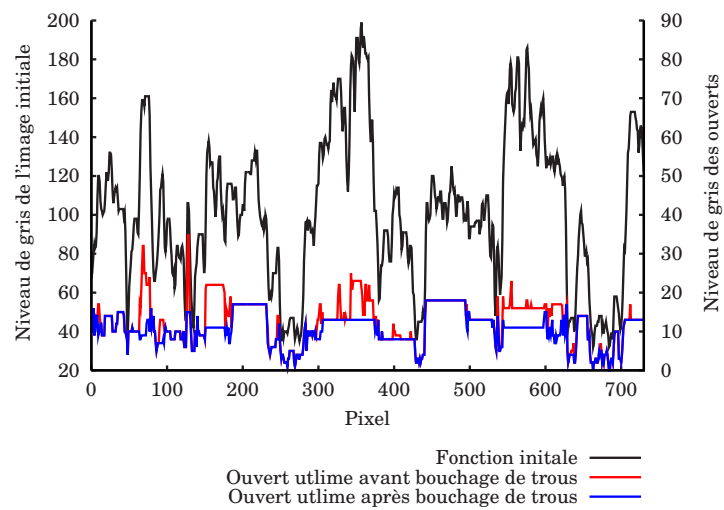


Fig. 2.57: Superposition des boules maximales sur l'image initiale



(a)



(b)

Fig. 2.58: (a) Image initiale pré-filtrée, (b) Profils des fonctions numériques

La même démarche a été évaluée pour la seconde image précédente (Fig. 2.26-b).

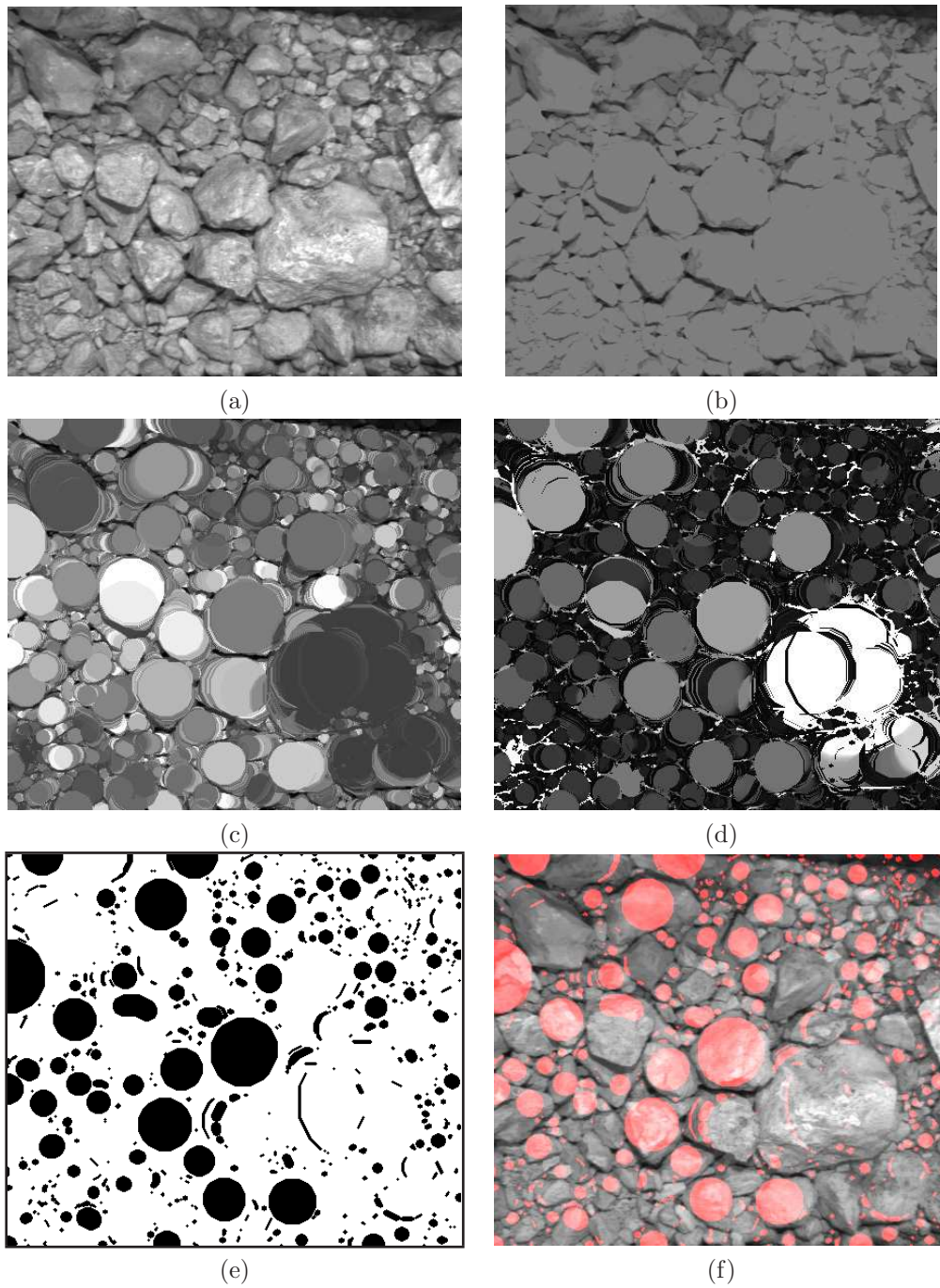


Fig. 2.59: (a) Image initiale pré-filtrée (f), (b) Image initiale après pré-filtrage et bouchage de trous (f'), (c) Ouvert ultime associé $\nu(f')$, (d) Fonction granulométrique associée à $\nu(f')$, (e) Boules maximales extraites pour $\nu(f')$, (f) Superposition des boules maximales sur l'image initiale

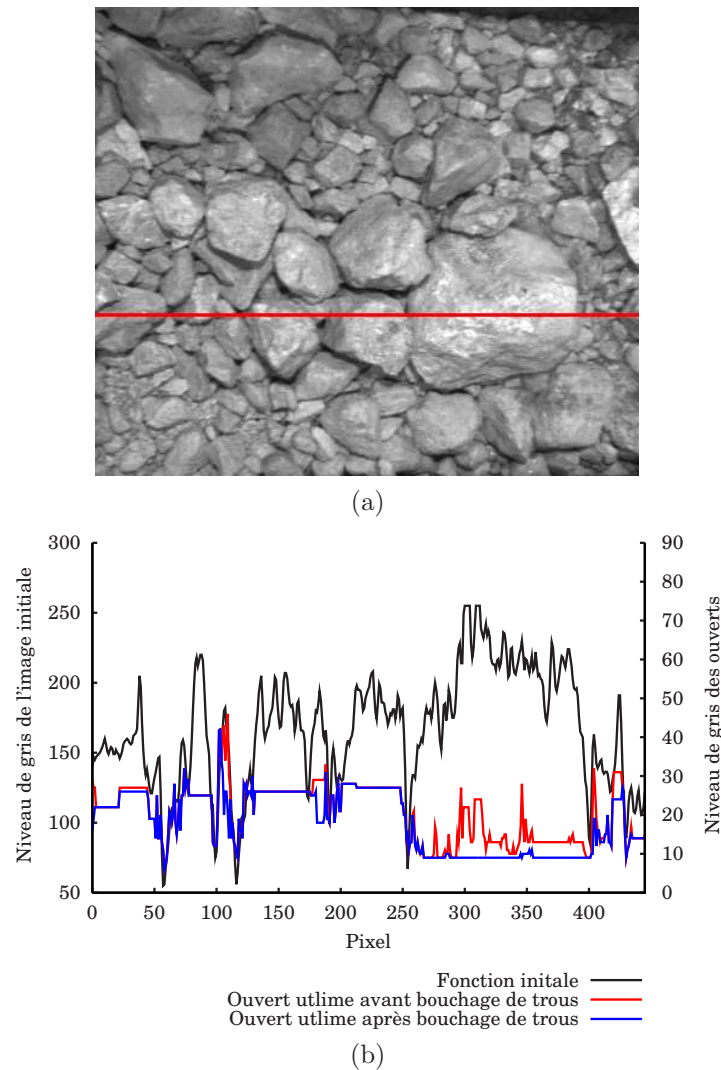


Fig. 2.60: (a) Image initiale pré-filtrée, (b) Profils des fonctions numériques

Résultats

L'utilisation de l'algorithme de bouchage de trous numérique et le calcul du Sup des résidus des ouvertures nous a donc permis de simplifier considérablement l'image initiale.

Par ailleurs, il faut noter que les zones d'ombres entre fragments ne sont pas affectées par le bouchage des trous car elles apparaissent sur l'image inverse comme des pics positifs du signal.

Faisons une dernière remarque concernant l'évaluation de la démarche. En effet, lors des étapes précédentes nous avons évalué les différents filtrages sur la base du nombre et de l'emplacement des marqueurs que nous avons utilisé pour tracer la LPE. Pour ces nouveaux filtres, les résultats montrent que le nombre, l'emplacement et la taille des nouveaux marqueurs suffisent à valider la pertinence de la démarche. Nous verrons plus loin, dans la section (2.6.2) que la construction de la LPE confirme tout à fait ces résultats.

2.5.4 Synthèse du filtrage

Après l'étape de pré-filtrage qui a fait l'objet de la section 2.4, nous avons procédé au filtrage proprement dit. Les résultats précédents permettent de faire les conclusions suivantes :

Modification de la pente de la fonction distance : la première méthode qui consistait à modifier la pente de la fonction distance ne s'est pas avérée assez robuste. En effet, nous avons constaté que le filtrage des minima effectué, bien qu'il tienne compte de l'aspect topographique des images, n'est pas bien adapté au cas des distributions de tailles étalées. C'est ainsi que les résultats ont montré que la démarche présente des insuffisances quant au choix de la nouvelle pente de la fonction distance dont la pertinence dépend de la taille des éléments à filtrer.

Supremum des résidus des ouvertures : lors de la seconde méthode, les filtrages se sont basés sur les transformations résiduelles. Les opérateurs liés à ces dernières se sont montrés très efficaces en terme de réduction correcte des marqueurs pour le cas de nos images de fragments de roche :

- d'une part, par leur prise en compte de l'aspect topographique des images de fragments de roches, ils ont permis de réduire correctement les éventuels marqueurs.
- D'autre part, ils ont aussi amélioré le positionnement de ces derniers sur les éléments intéressants à extraire (pratiquement une boule maximale par fragments).

Nous avons noté aussi, à ce niveau, que l'apport du bouchage de trous est meilleur lorsqu'il est effectué en amont sur l'inverse de l'image pré-filtrée.

Par ailleurs, afin d'illustrer l'apport du filtrage effectué, nous avons utilisé un critère géométrique de tri assez simple pour extraire les boules maximales directement à partir de la fonction granulométrique associé à l'ouvert ultime. Pour les mêmes raisons évoquées auparavant (une boule par fragment), ceci a confirmé l'atteinte de l'objectif de **réduction du bruit** poursuivi à ce stade.

Mise à part la réduction du bruit, on peut noter que la perte de quelques boules maximales pertinentes tient au fait que l'extraction est conduite sur l'image granulométrique après construction. Cette dernière étant altérée irréversiblement par quelques bruits résiduels dus notamment aux textures sombres, une extraction correcte de l'ensemble des boules maximales pertinentes n'était pas possible.

Textures sombres et Fixation de la taille maximale

Concernant les textures sombres, il est clair qu'un bouchage de trous opéré sur l'image pré-filtrée (et non sur son inverse) altérera irréversiblement les zones d'ombres correspondantes entre fragments qui seront aussi considérées comme des trous dans le relief topographique. Ceci se traduira par une perte de l'information recherchée.

D'autre part, abstraction faite du choix d'une taille maximale, l'objectif d'éviter le problème de la connaissance préalable des éléments à extraire, rencontré au cours de la méthode précédente, a été aussi atteint grâce à la fixation d'une taille maximale unique. Comme évoqué précédemment, cette dernière a été utilisée surtout pour assurer une convergence rapide de l'algorithme.

La résolution du problème des textures sombres ainsi que celui lié à la fixation d'une taille maximale fera partie de l'**amélioration de l'extraction des marqueurs** (section 2.6). Nous verrons qu'il est possible d'améliorer l'extraction des marqueurs en raisonnant sur un deuxième niveau de résidus : le résidu de deux résidus successifs.

2.5.5 Récapitulatif

Différentes méthodes ont été évaluées pour le pré-filtrage et aussi pour le filtrage. En guise de récapitulatif, et avant d'entamer la phase finale des traitements, le schéma (Fig. 2.61) illustre les pré-filtrages et les filtrages retenus jusqu'ici pour nos images de fragments de roches.

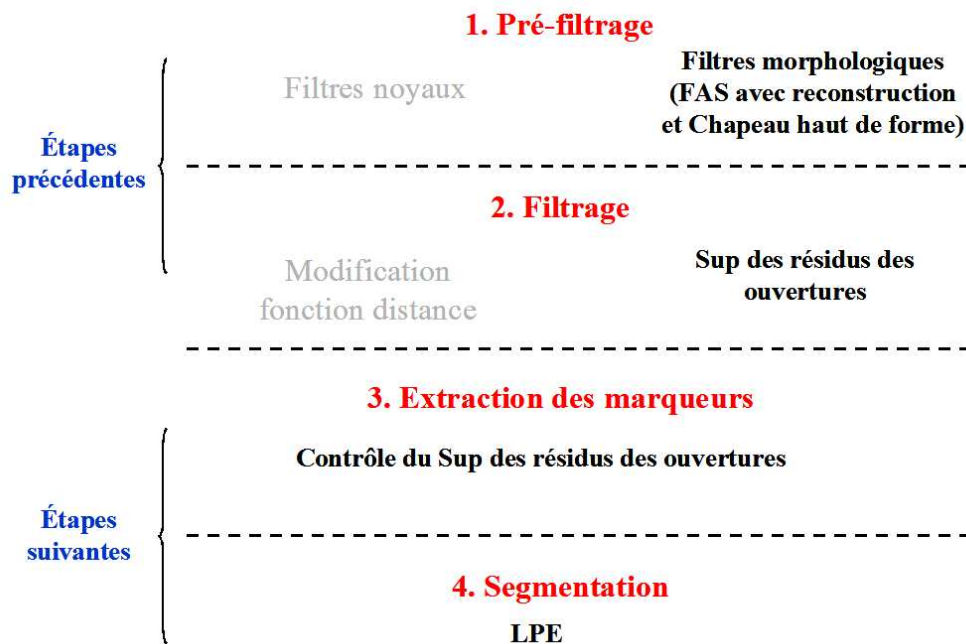


Fig. 2.61: Séquence des traitements 2D suivie lors de cette étude

2.6 Information surfacique 2D : Extractions des marqueurs et segmentation par LPE

2.6.1 Boules maximales inscrites par contrôle du Sup des résidus

Pour pouvoir obtenir correctement les boules maximales pertinentes, il faut éviter une extraction finale des boules maximales à partir de la fonction granulométrique éventuellement altérée par des bruits résiduels.

Rappelons que nous avons à résoudre les deux problèmes suivants :

- le premier est celui dû aux textures sombres, où certaines boules **plus petites**, par leur niveau de gris relatif plus grand, peuvent “empêcher” les boules pertinentes (plus grandes en taille) de se placer entièrement sur le Sup. Ces dernières étant trouées, elles sont éliminées lors du tri ($N_{Ts} > N_F - N_{Ts}$),
- le second est celui de l'introduction d'une taille maximale lors de la construction de l'ouvert ultime. Il est dû à l'éventualité que des boules maximales **plus grandes** viennent se placer sur des boules maximales pertinentes, plus petites en taille cette fois-ci, qui correspondent aux fragments ($N_Z > N_F - N_{Ts}$).

La solution proposée, que nous avons appelée *boules maximales pertinentes par contrôle des Sup des résidus*, tente de contrôler au fur et à mesure l'implantation des éléments de l'ouvert ultime. Elle repose sur l'exploitation d'un second degré de résidus : le **résidu de deux résidus d'ouvertures successifs**, qu'on notera χ :

$$\chi_\tau = \nu_\tau - \nu_{\tau-1} \quad (2.45)$$

avec

$$\nu_\tau = \sup_{\lambda \in [0, \tau]} (\gamma_\lambda(f) - \gamma_{\lambda+1}(f)) \quad (2.46)$$

$$\nu_{\tau-1} = \sup_{\lambda \in [0, \tau-1]} (\gamma_\lambda(f) - \gamma_{\lambda+1}(f)) \quad (2.47)$$

χ_τ correspond ainsi aux éléments de γ_λ qui vont être effectivement placés dans l'image de l'ouvert ultime pour le seuil τ , apparaissant ainsi dans les Supremum. Par définition, avant placement sur le Sup, ces éléments sont tous de taille τ (ils correspondent en effet à la différence de $\gamma_\lambda(f) - \gamma_{\lambda+1}(f)$). Cependant, après l'opération du Sup, pour les raisons évoquées auparavant concernant le “niveau de gris relatif”, certains de ces éléments ne seront plus que des portions des boules de taille τ .

En se basant sur un critère géométrique donné, l'objectif poursuivi est de récupérer, en premier lieu, aussi bien les boules maximales pertinentes entières que les portions de celles-ci susceptibles d'être perdues lors de l'implantation du Sup. En second lieu, les portions seront reconstruites puis regroupées avec les boules entières du seuil associé à τ .

La totalité des boules maximales (entières et reconstruites) de taille τ récupérées après le tri constitueront les boules maximales, que nous appellerons, **significatives** pour le seuil τ .

Au fur et à mesure de la progression de la taille donnée par τ , certaines boules significatives pour des seuils inférieurs seront recouvertes par d'autres boules plus grandes. Au final, les boules

jugées les plus significatives pour tous les seuils, correspondront aux différents fragments et seront les **boules pertinentes** recherchées.

Le séquence détaillée de la procédure de traitement est illustré par un traitement sur une image réelle. Pour cet exemple on choisira comme taille $\tau = 11$. En effet, cette dernière étant équivalente aux petits fragments de l'image, elle nous permettra de visualiser les problèmes de filtrage rencontrés ainsi que les solutions apportées lors de cette analyse. Les figures (2.62) et (2.63) montreront la démarche générale adoptée.

Par ailleurs, certaines difficultés de filtrage ayant un caractère non systématique, elles ne sont pas rencontrées dans toutes les images. Par conséquent, d'autres images seront employées pour certaines illustrations (Fig. 2.66, 2.64 et 2.65).

1. Extraction des boules significatives ou portions de ces dernières (seuil τ)

Pour chaque taille τ , un critère géométrique de tri est appliqué à χ_τ (Fig. 2.62-d). Il consiste à opérer une ouverture de taille $(\frac{\tau}{a} + b)$ sur les éléments de χ_τ . Où a et b sont des constantes fixées en fonction de la forme globale des fragments étudiés. Pour cet exemple $a = 2$ et $b = 1$.

L'application de cette ouverture permet de ne garder que les boules maximales ou les portions de boules maximales ayant une taille supérieure à $(\frac{\tau}{a} + b)$ (Fig. 2.62-f). Ainsi, les éléments très petits, qui peuvent correspondre éventuellement à des textures sombres sur les fragments, tels que $N_{Ts} > N_F - N_{Ts}$, seront éliminés (Fig. 2.62-f). De même, les éventuelles boules maximales plus grandes mais trop trouées sont éliminées et ne peuvent ainsi pas couvrir des boules significatives dans le Sup (cas où $N_Z > N_F - N_{Ts}$).

2. Récupération des boules correspondantes aux portions significatives

Avant d'affecter les éléments significatifs du seuil τ à la nouvelle fonction des Sup, les portions doivent être reconstruites. Sachant qu'à l'origine (avant Sup) elles appartiennent au résidu $(\gamma_\lambda(f) - \gamma_{\lambda+1}(f))$ (Fig. 2.62-c), les boules maximales de ce dernier peuvent être utilisées pour la reconstruction des portions dont elles sont à l'origine. Pour ce faire, seules les boules de ν_τ de taille τ qui correspondent aux portions doivent être considérées. Elles sont obtenues en opérant une ouverture de taille $\tau - 1$ à ν_τ , qu'on notera Υ_τ . (Fig. 2.62-e).

$$\Upsilon_\tau = \gamma_{\tau-1}(\nu_\tau) \quad (2.48)$$

Les portions à reconstruire seront donc celles qui correspondent à des boules maximales de taille τ de Υ_τ . La superposition des deux images illustre les portions à reconstruire et les boules maximales d'origine (Fig. (2.62)-g, (2.63)-a, (2.63)-b et (2.63)-c).

Cependant, lorsque la portion correspond à une boule maximale connectée avec d'autres boules dans Υ_τ , la récupération s'avère problématique. Plusieurs approches sont envisageables :

– Reconstruction géodésique

En effet, une reconstruction basée sur une dilatation géodésique de l'image des portions (prise comme marqueur) dans l'image Υ_τ (considérée comme masque) tend à fournir des boules jugées non-significatives lors de l'application du critère géométrique, car ni elles ni les portions (pouvant y appartenir) n'apparaissent dans χ_τ . Le même problème peut

donner lieu à une seule boule maximale pour un ensemble de fragments regroupés (Fig. (2.63)-c et (2.64)-a).

– **Dilatation géodésique de taille τ**

De même, une dilatation géodésique de taille τ de l'image des portions dans Υ_τ donnera des boules maximales “désaxées” par rapport à celles équivalant réellement aux fragments, ou du moins à celles de l'image Υ_τ . En effet, la forme des portions donne lieu à une dilatation géodésique qui n'est pas isotrope dans le sens où elle ne fournirait pas la même boule originaire de la portion (Fig. 2.65).

– **Reconstruction à partir des boules maximales critiques**

Enfin, la méthode la plus correcte, retenue ici, utilise la notion de boules maximales critiques définie précédemment. En effet, le raisonnement basé sur les boules maximales critiques des éléments connectés montre que la portion ne peut être contenue entièrement que dans une seule des boules critiques et c'est évidemment la boule qui est à son origine.

Après calcul des boules maximales critiques (et leurs centres) pour les éléments connectés (algorithme explicité dans la section 2.5.3)(Fig. (2.63)-d), l'extraction du centre de la boule maximale critique en question (qui correspond à la portion) consiste à éroder successivement la portion jusqu'à ce qu'elle ne rencontre qu'un seul des centres des boules maximales critiques des éléments connectés (Fig. 2.63 -e).

Le calcul de ces centres des boules permet, ensuite, par une simple dilatation de taille τ de reconstruire les boules maximales significatives qui sont à leur origine (Fig. 2.63 -f).

3. Nouveau Sup des résidus et Boules maximales pertinentes

A présent, les éléments de χ_τ ayant déjà la taille τ peuvent être regroupés avec les portions reconstruites (Fig. 2.63-g). Ils correspondent aux **boules maximales significatives** pour ce seuil.

Le résultat du contrôle de l'implantation du nouveau Sup est que lors de son calcul, les boules maximales significatives vont éventuellement couvrir certaines boules de petites tailles et seulement celles-ci. En conséquence, aucune boule maximale de petite taille ne se placera dans le Sup sur une boule de plus grande taille.

D'autre part, à partir de la taille de la boule qui correspond au plus grand fragment de l'image, toutes les boules des seuils supérieurs vont être assez “trouées” pour ne pas être filtrées par le critère géométrique. Par conséquent, aucune boule ne se placera plus sur l'image, ce qui résout le problème de la définition d'une taille maximale (Fig. 2.66).

Notons enfin que par construction, les boules maximales pertinentes ne sont pas recouvertes. Un simple seuillage de l'image Sup permet de récupérer les différentes **boules maximales pertinentes** qui peuvent être utilisées comme marqueurs (Fig. 2.67).

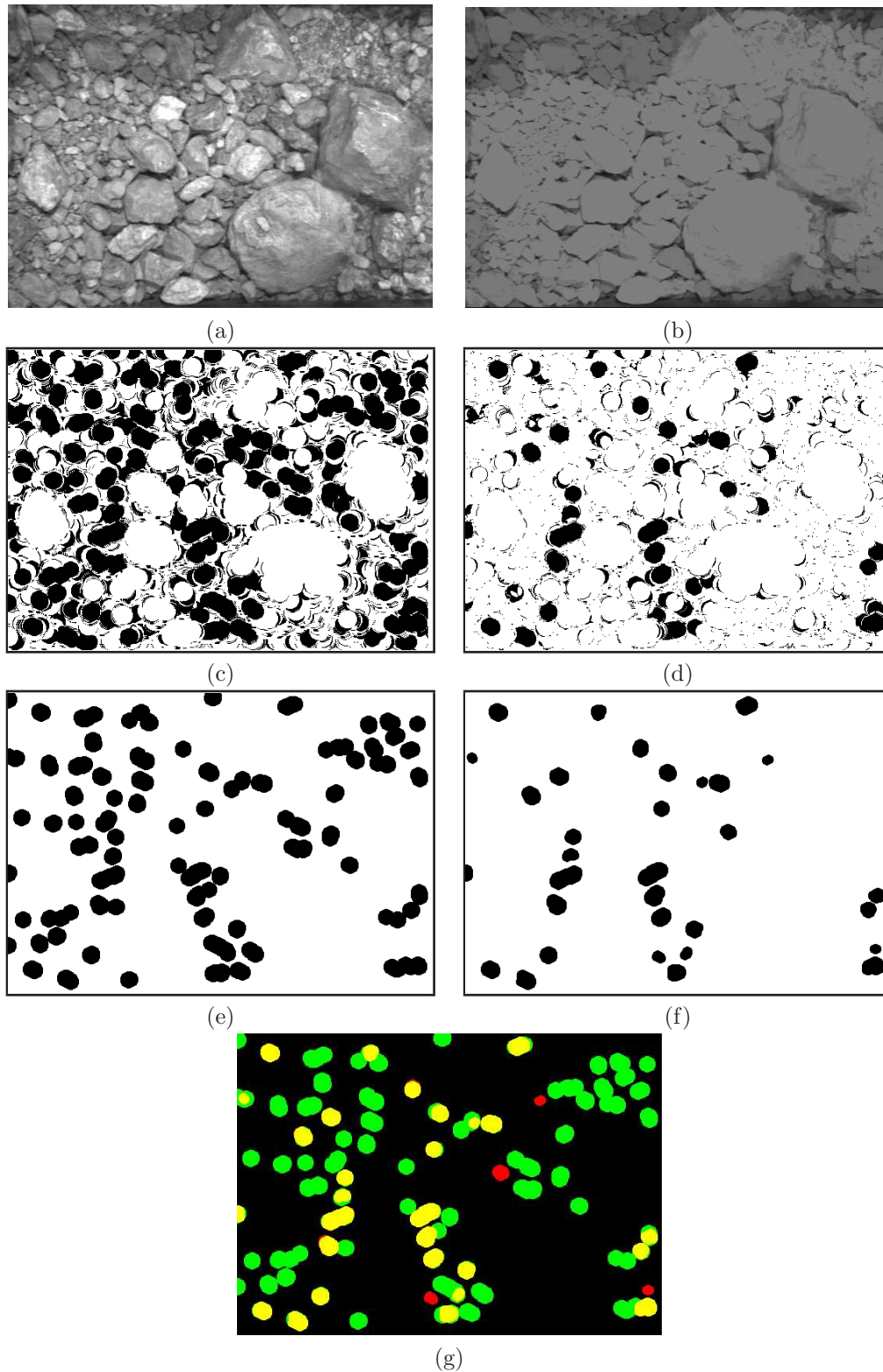


Fig. 2.62: (a) Image initiale (f), (b) Image initiale après pré-filtrage et bouchage de trous (f'), (c) Ouvert ultime associé de taille 11 : $\nu_{11}(f')$, (d) $\chi_{11}(f')$, (e) Ouvert ultime associé à la taille 11 après ouverture de taille 10 : $\Upsilon_{11}(f')$, (f) Critère géométrique : $\gamma_6(\chi_{11}(f'))$ après application du critère géométrique, (g) Superposition (jaune) de (e) (éléments verts) et (f) (éléments rouges)

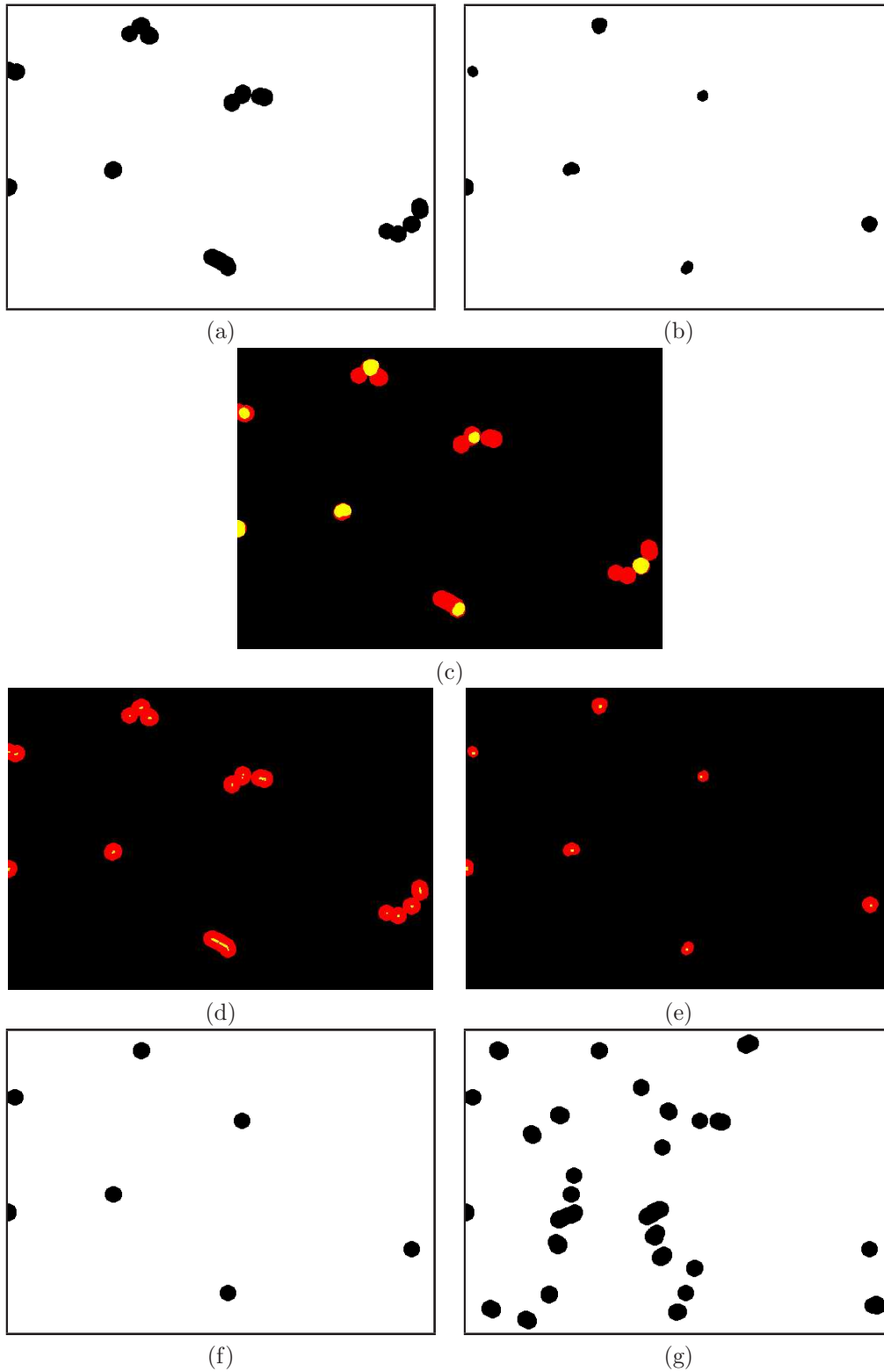


Fig. 2.63: (a) Boules maximales de $\Upsilon_{11}(f')$ qui sont à l'origine des portions à reconstruire, (b) Portions à reconstruire qui correspondent aux boules de $\Upsilon_{11}(f')$ de taille 11, (c) Superposition de (a) (rouges) et (b) (jaunes), (d) Centres des boules maximales critiques de $\Upsilon_{11}(f')$, (e) Centres critiques pertinents (équivalents aux portions) (jaunes), (f) Portions reconstruites (dilatation de taille 11 des centres pertinents), (g) Boules maximales significatives : Regroupement des boules maximales de taille 11 de χ avec les portions reconstruites

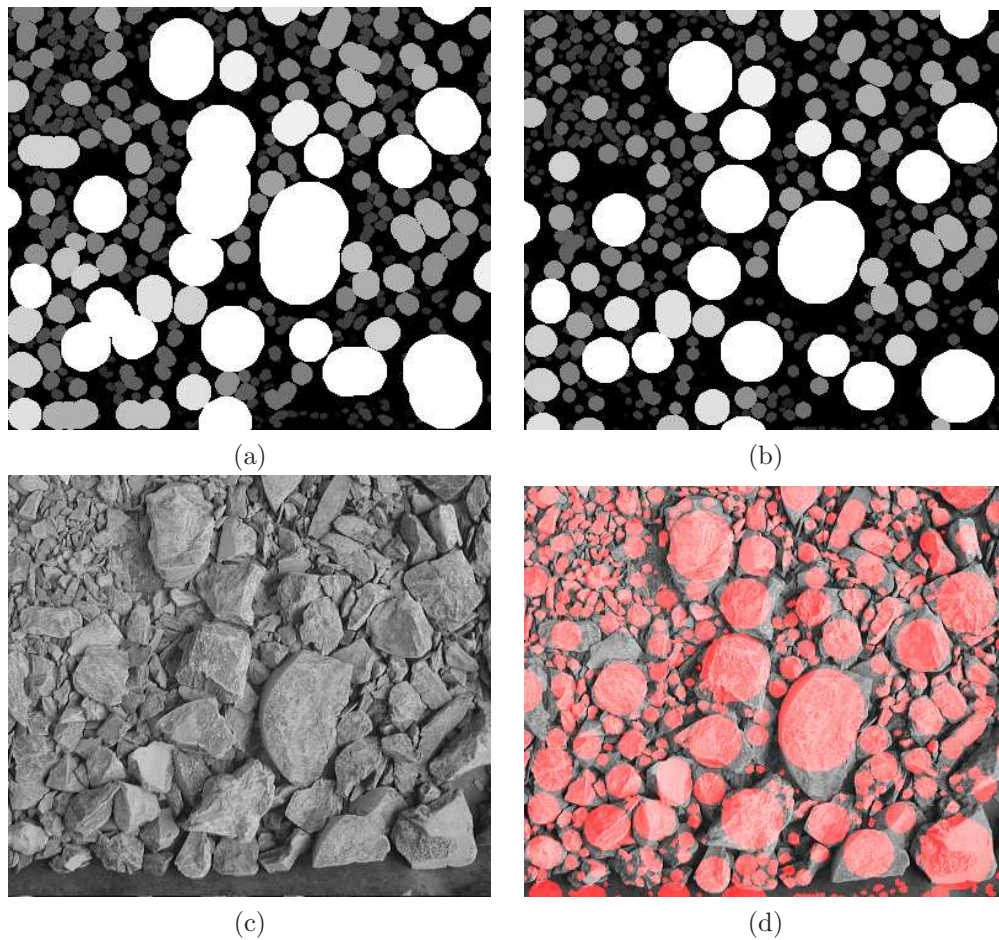


Fig. 2.64: (a) Boules reconstruites par dilatation géodésique, (b) Boules reconstruites à partir des boules maximales critiques, (c) Image initiale, (d) Superposition des boules extraites à partir des boules maximales critiques avec l'image initiale (la "fusion" des boules équivalentes aux trois fragments du centre de l'image a été évitée)

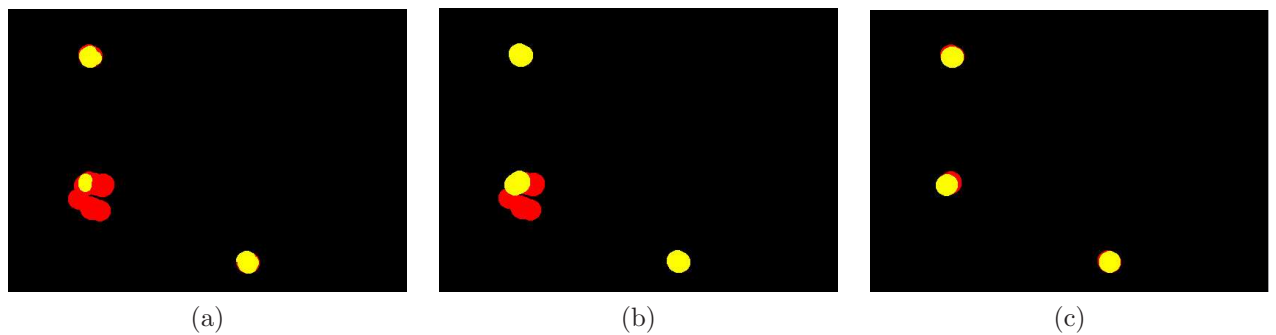


Fig. 2.65: (a) Superposition du résidu filtré (rouge) avec les portions à reconstruire (jaunes) (seuil $\tau = 15$), (b) Boules reconstruites après dilatation géodésique (jaunes), (c) **Problème de "désaxage"** : boules maximales extraites par géodésie (rouges) superposées à celles extraites par boules critiques maximales (jaunes) :

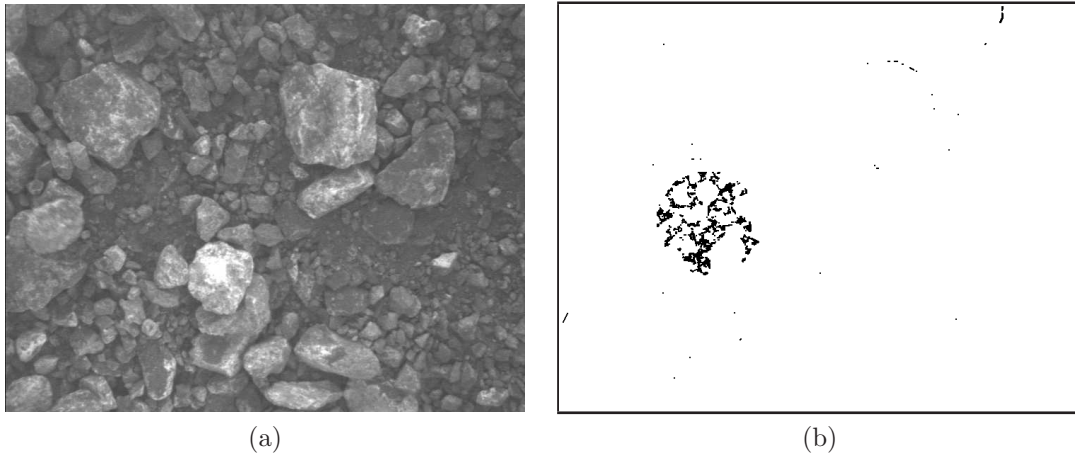


Fig. 2.66: (a) Image initiale, (b) Boule maximale de taille 70 apparaissant sur χ_{70} (mais ne correspondant pas à un fragment)

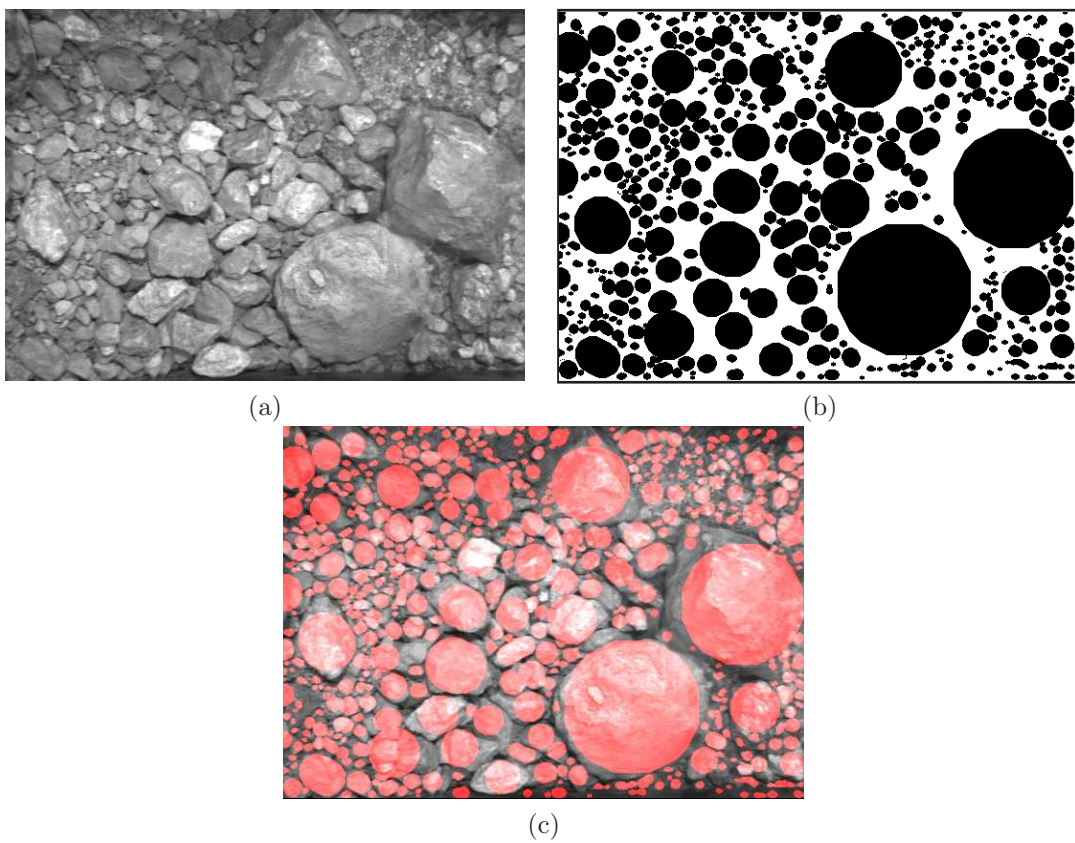


Fig. 2.67: (a) Images initiale, (b) **Boules maximales pertinentes** : boules significatives par rapport à tous les seuils, (c) Superposition des boules maximales pertinentes sur l'image initiale

Résultats obtenus sur d'autres images de fragment de roches

L'application de la même procédure à d'autres types d'images, avec des conditions de présence de bruit différentes, montre que les boules maximales pertinentes extraites correspondent assez correctement aux différents fragments à extraire (Fig. 2.68, 2.69, 2.70 et 2.71).

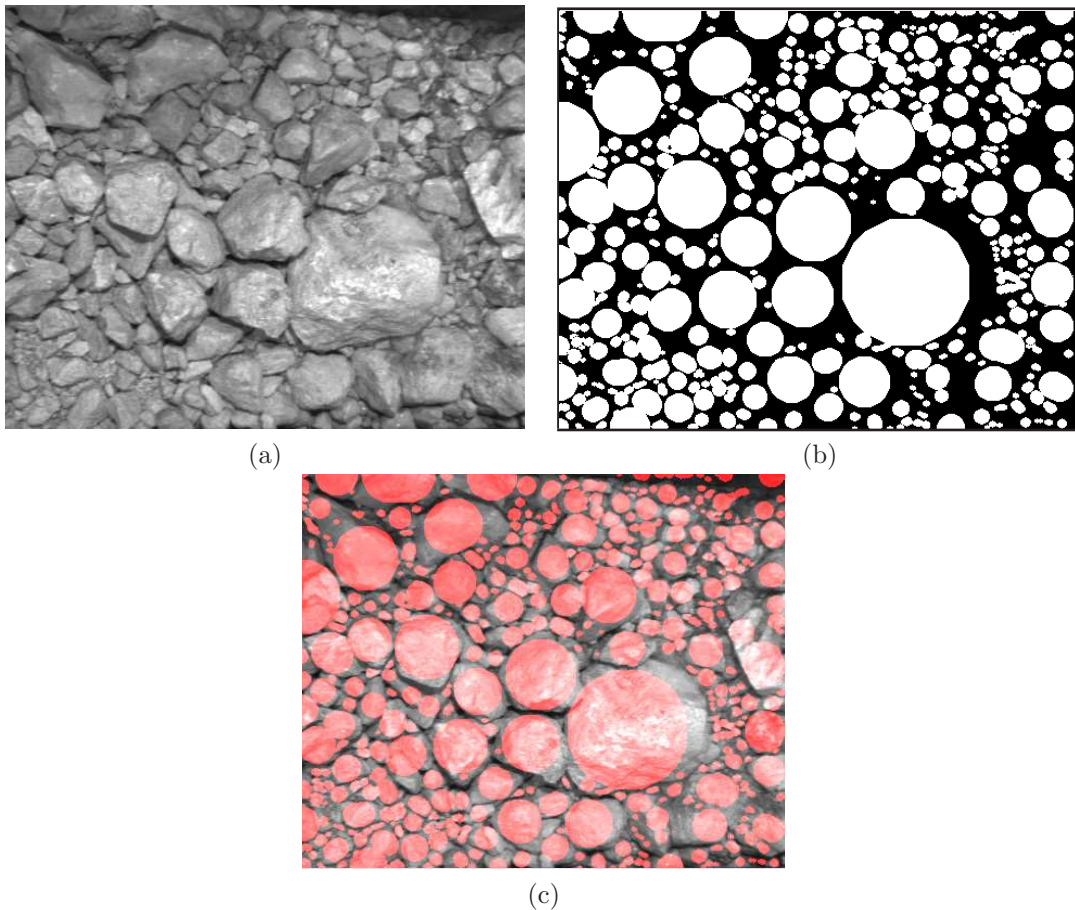


Fig. 2.68: (a) Image initiale, (b) **Boules maximales pertinentes** : boules significatives par rapport à tous les seuils, (c) Superposition des boules maximales pertinentes sur l'image initiale

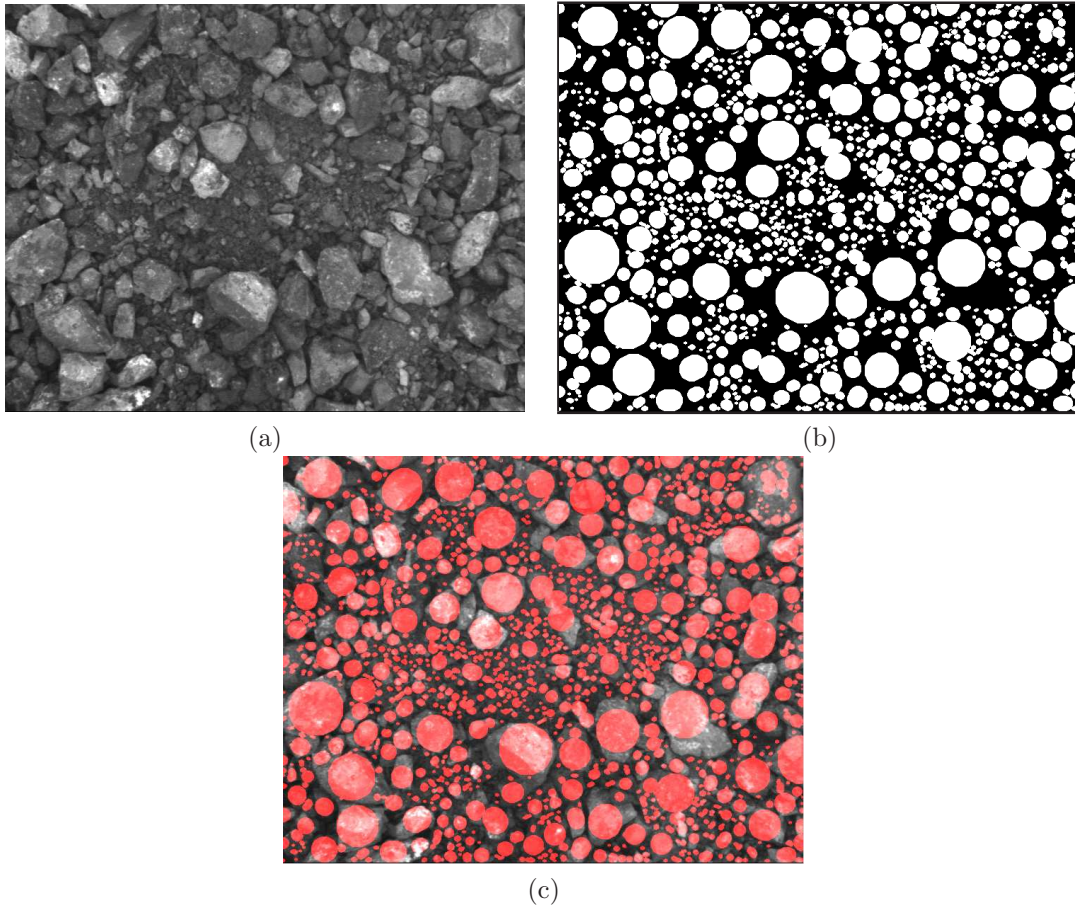


Fig. 2.69: (a) Image initiale, (b) **Boules maximales pertinentes** : boules significatives par rapport à tous les seuils, (c) Superposition des boules maximales pertinentes sur l'image initiale

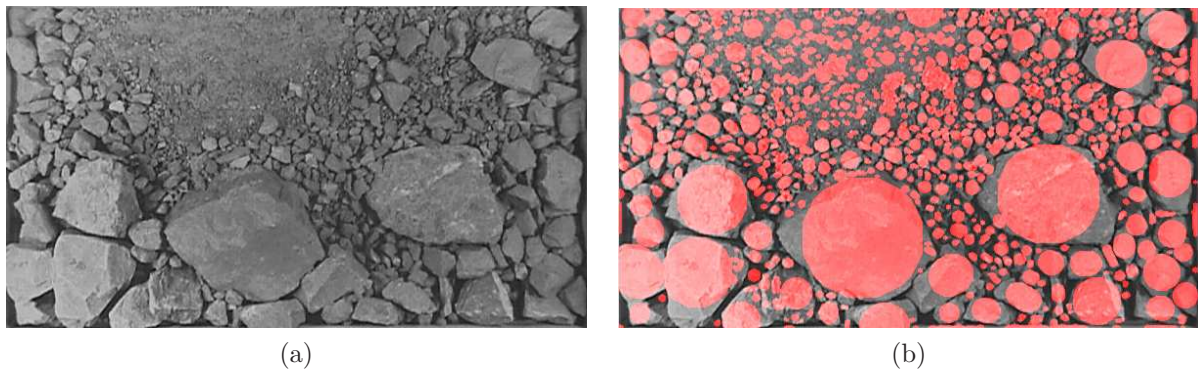


Fig. 2.70: (a) Image initiale, (b) Superposition des boules maximales pertinentes sur l'image initiale

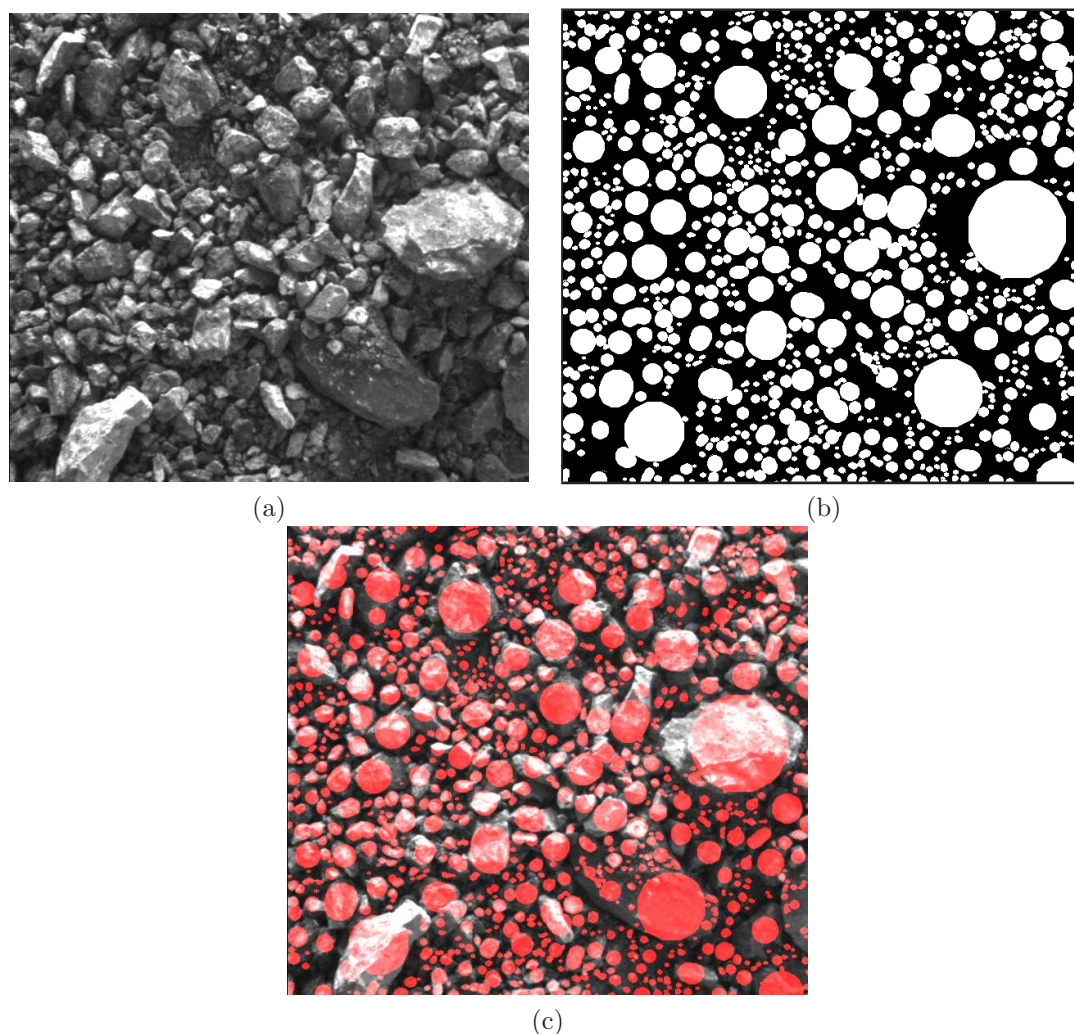


Fig. 2.71: (a) Image initiale, (b) **Boules maximales pertinentes** : boules significatives par rapport à tous les seuils, (c) Superposition des boules maximales pertinentes sur l'image initiale

Synthèse

Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- la procédure utilisée peut être appliquée sur différents types d'images, avec présence éventuelle de particules fines.
- Le problème causé par les textures résiduelles après filtrage a été résolu grâce au contrôle de la construction de l'ouvert ultime.
- Le critère géométrique introduit permet de résoudre aussi le problème de convergence rencontré lors du calcul de ν_τ . L'introduction d'une taille maximale n'est plus nécessaire puisque les résidus de grandes tailles qui ne correspondent pas à des fragments sont éliminés lors du calcul de χ . L'idempotence est atteinte lorsque le niveau de gris de l'image sur laquelle l'ouvert ultime est calculé devient égal à 0. Nous pouvons cependant pour les mêmes raisons de temps de calcul introduire une taille maximale assez grande par rapport aux éventuels plus grands fragments des images.

- Enfin, l'objectif de la réduction et de l'extraction des marqueurs a été atteint puisque les différentes boules maximales inscrites peuvent aussi être utilisées comme marqueurs imposés pour le traçage de la LPE des images.

Remarque

Le paramètre que nous devons manipuler avec attention est évidemment le critère de taille, plus précisément les deux paramètres a et b . En effet, le type de roche ainsi que l'état initial de la fracturation (débit naturel de la roche) influencent la forme des fragments après abattage. Certaines roches peuvent ainsi avoir une forme qui dépend de la taille des fragments.

La flexibilité du critère permet de fixer a et b pour chaque intervalle de taille en fonction d'une connaissance préalable de la roche étudiée. Attirons l'attention que ce n'est pas le même problème rencontré lors de la modification de la pente de la fonction distance. En effet, il s'agit plutôt de déterminer ces paramètres indépendamment des fragments présents sur chaque image.

En pratique, lorsque les fragments sont de forme globale circulaire, comme l'a montré le résultat précédent, les valeurs $a = 2$ et $b = 1$ supposent que les portions ayant une taille supérieure à la moitié du disque de taille τ seront significatives. Pour d'autres formes de fragments (allongés par exemple), un calibrage de ces deux valeurs ou l'emploi d'un élément structurant non isotrope (union de segments par exemple) pourront être envisagés.

2.6.2 Segmentation des images par LPE contrôlée

L'étape finale des traitements $2D$ consistera à extraire les contours entiers des fragments de l'image par LPE. Comme explicité auparavant, la construction de cette dernière est effectuée en se basant sur deux principaux éléments : les marqueurs et l'image définissant les contours (pour la plupart du temps le gradient). Le contrôle des Sup des résidus nous a donc permis d'extraire les marqueurs corrects ; la boule maximale inscrite à l'intérieur de chaque fragment notamment : ceci a constitué le premier maillon.

Les gradients seront généralement calculés sur l'image initiale pré-filtrée par FAS et bouchage de trous. Nous verrons aussi qu'une amélioration du positionnement des contours extraits par LPE sera possible lorsque les images sont correctement contrastées.

2.6.2.1 Gradients calculés sur l'image pré-filtrée

La première possibilité consiste donc à calculer le gradient sur l'image pré-filtrée (Fig. 2.72-b) qui a servi pour l'extraction des boules maximales inscrites (Fig. 2.72-c). Pour une meilleure définition des contours par LPE, le gradient sera renforcé par le chapeau haut-de-forme noir calculé sur la même image (Fig. 2.72-d). La taille de l'élément structurant (disque) utilisé pour le calcul du chapeau haut-de-forme est choisie de façon à correspondre à la taille moyenne des zones d'ombres entre fragments. Comme expliqué dans la section (2.3), la construction de la LPE est contrôlée par les marqueurs sur l'image Sup du gradient et du chapeau haut-de-forme (Fig. 2.73).

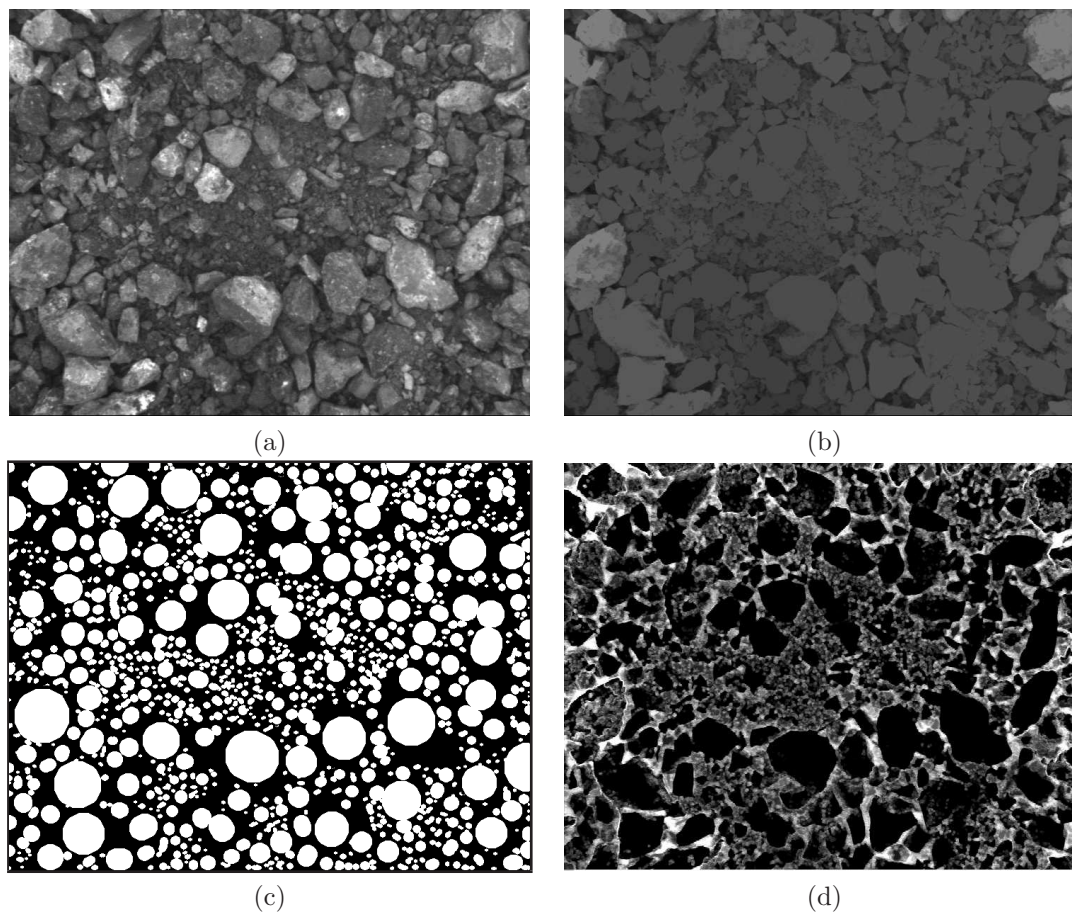


Fig. 2.72: (a) Images initiale, (b) Image pré-filtrée, (c) **Marqueurs** : boules maximales pertinentes extraites par contrôle des Sup des résidus, (d) Supremum du gradient de l'image pré-filtrée et de son chapeau haut-de-forme noir de taille 5

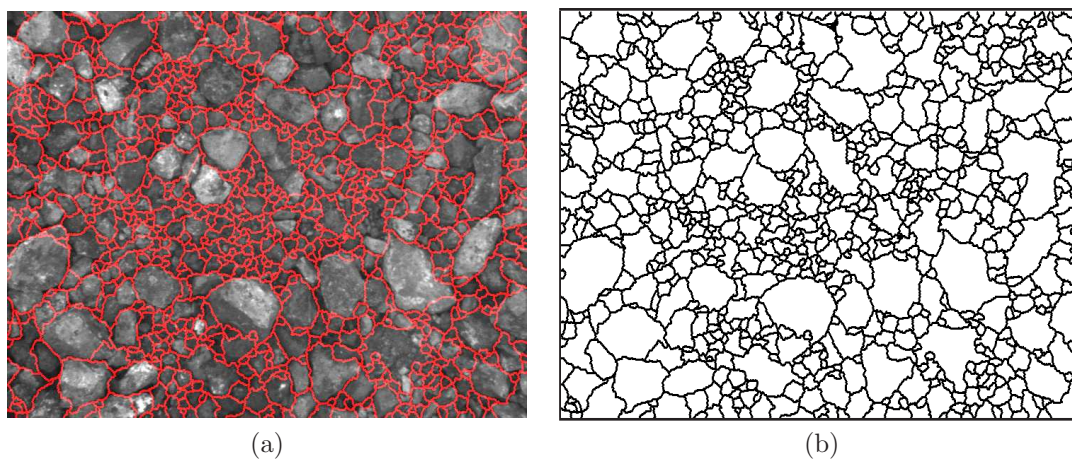


Fig. 2.73: (a) Segmentation de l'image par LPE contrôlée, (b) Image binaire équivalente

Les mêmes traitements sont effectués sur d'autres types d'images.

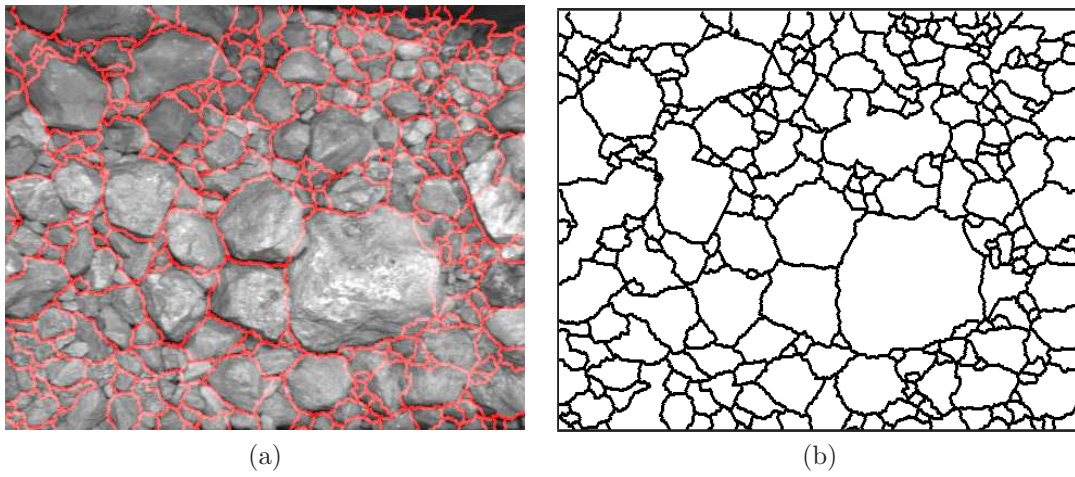


Fig. 2.74: (a) Image initiale, (b) Segmentation de l'image par LPE contrôlée

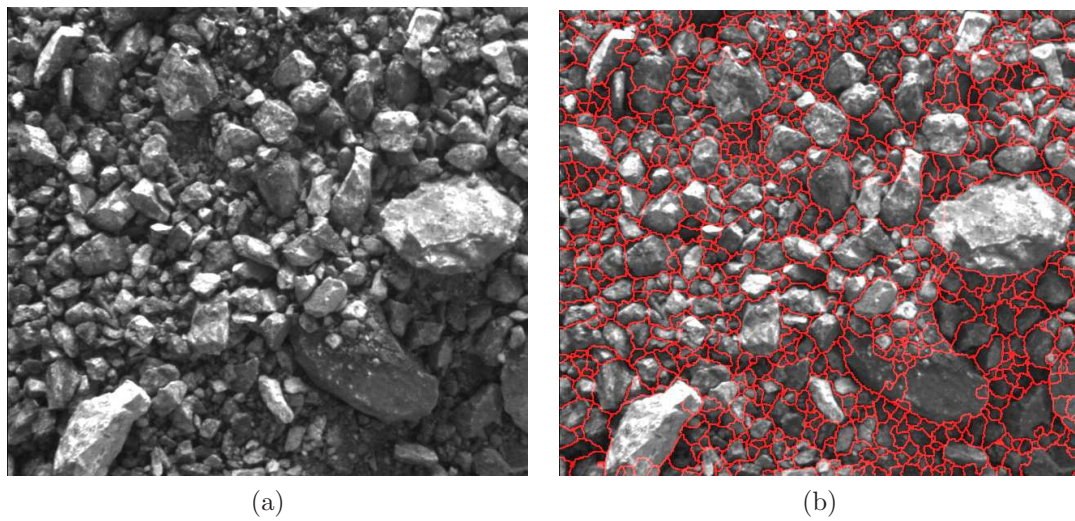


Fig. 2.75: (a) Image initiale, (b) Segmentation de l'image par LPE contrôlée

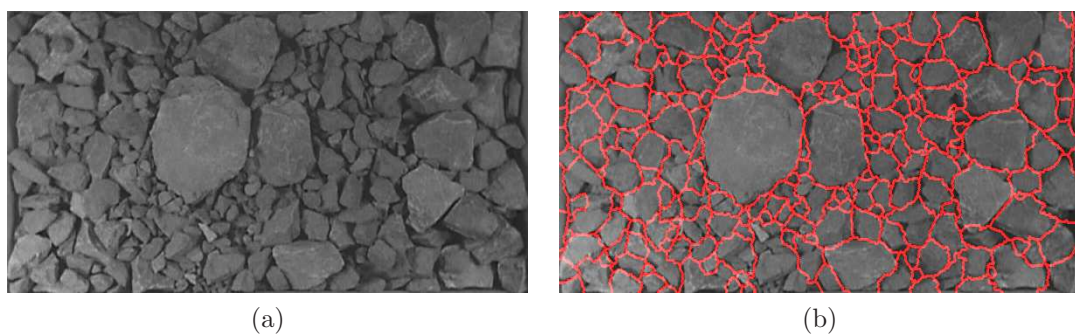


Fig. 2.76: (a) Image initiale, (b) Segmentation de l'image par LPE contrôlée

Commentaires

L'analyse des contours obtenus nous permet de faire les constations suivantes :

- les problèmes de sur-segmentation et de fusion constatés auparavant sont considérablement réduits. Les contours extraits de la construction de la LPE contrôlée par marqueurs à partir des boules maximales sont pour la majeure partie assez fidèles aux contours réels des fragments,
- comparée à l'information granulométrique déjà offerte par les boules maximales inscrites, l'information des surfaces est donc encore largement améliorée.

2.6.2.2 Gradients calculés sur la fonction granulométrique modifiée de l'image pré-filtrée

L'**amélioration** des contours consiste à calculer le gradient sur la fonction granulométrique de l'image pré-filtrée.

En effet, lorsque l'image des fragments de roche est correctement contrastée, la même opération qui permet de calculer l'ouvert ultime donne accès à une fonction granulométrique correctement filtrée.

Avant d'explicitier la procédure utilisée, illustrons le cas des images correctement "contrastées". Comme le montre la figure (Fig. 2.77-a), cela signifie que la majorité des zones d'ombres appartiennent à un intervalle de niveau de gris inférieur à celui des fragments. Le cas contraire se manifeste lorsque les zones de gris correspondantes aux fragments se chevauchent avec celles des zones d'ombres (Fig. 2.77-b).

Procédure de calcul

Sur le premier type d'images, en parallèle de la construction de l'ouvert ultime, il est possible de calculer une fonction Sup en affectant à chaque résidu un niveau de gris égal à la taille de la plus petite des deux ouvertures servant à le calculer λ (Eq. 2.38).

De même que la fonction granulométrique précédemment définie, la nouvelle fonction donne aussi à chaque pixel de l'image la taille du plus grand cylindre significatif qui le recouvre. Nous l'appellerons **fonction granulométrique modifiée**. La différence avec la fonction granulométrique précédente est que l'attribution des niveaux de gris (ou "labélisation") des différents résidus est effectuée en même temps que l'opération du Sup et non après.

Par cette construction, la fonction granulométrique se trouve d'emblée filtrée puisque les structures de petites tailles claires et sombres situées sur les fragments sont couvertes lors du Sup. Comme le montreront les traitements qui vont suivre, ceci permettra de positionner encore plus correctement les contours des fragments (Fig. 2.79-d). De même, l'extraction des boules maximales pertinentes sur chaque seuil, par la même méthode de tri précédemment illustrée, est aussi améliorée (Fig. 2.79-e).

Cependant cette opération n'est possible qu'à condition que la construction de la fonction granulométrique soit arrêtée avant perte de l'information des zones d'ombre entre fragments (ou lorsque localement, les ouverts correspondent aux fragments). Ceci correspond au même problème de définition d'une taille maximale τ , pour l'arrêt de l'opération du Sup, rencontré lors du calcul des résidus.

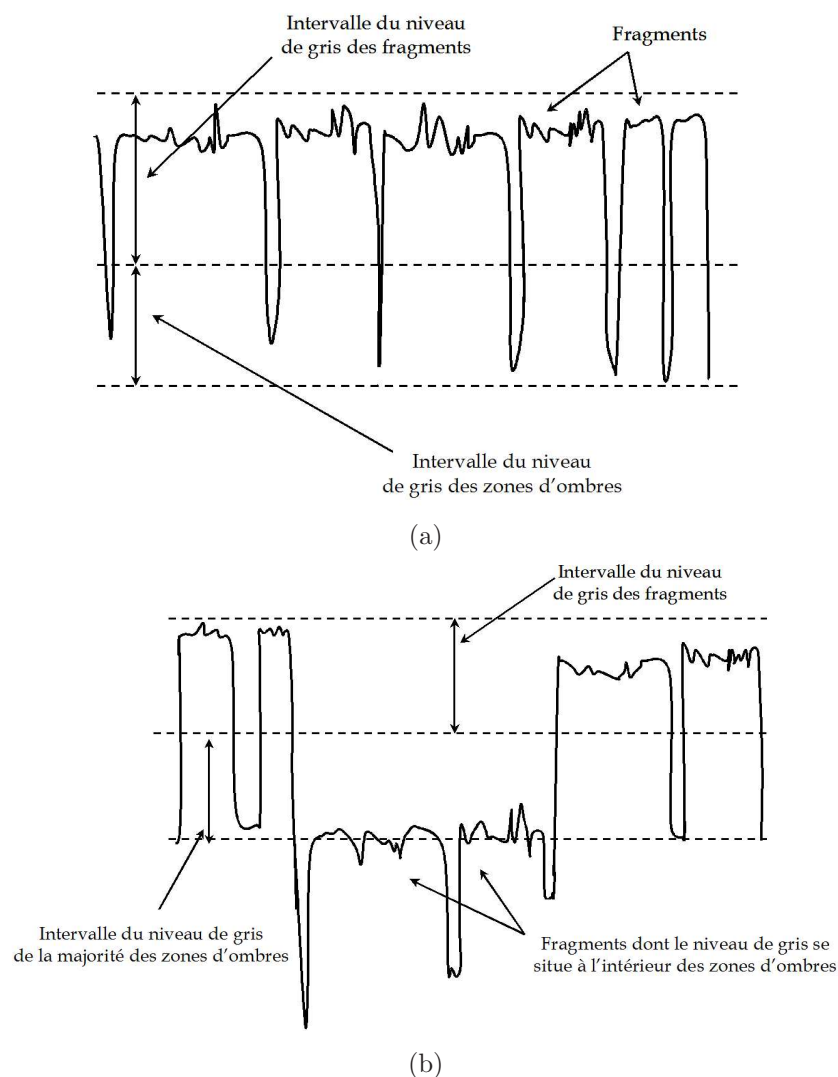


Fig. 2.77: (a) Sous-graphe illustrant une image de fragments de roches correctement contrastée, (b) Sous-graphe illustrant une image de fragments de roches contrastés de manière irrégulière

Mise à zéro des zones d'ombres

La solution consiste à mettre à zéro les zones de transition entre fragments en diminuant la fonction initiale d'une constante α . Ainsi, lorsque les ouvertures atteignent localement le "nouveau fond" (mise à zéro) leur effet disparaît localement, ce qui est équivalent à un arrêt au niveau de ces zones.

Définition de la constante de "mise à zéro" : α

La "mise à zéro" qui correspond à une séparation des deux populations "fragments" et "zones d'ombres" est basée sur l'analyse de l'histogramme des niveaux de gris de l'image (h_f). En effet, utilisé lors du seuillage des images à niveaux de gris, l'histogramme permet de calculer la valeur de séparation (C) suivant différentes méthodes (ou critères). La plus retenue dans le cas des images de fragments de roches est celle dite de maximisation d'entropie, où C est calculée pour un histogramme ayant deux modes comme suit :

$$C = \min_{u_T} \left\{ \sum_{n=t_{min}}^{n=u_T} (n - n_1)^2 h_f[n] + \sum_{n=u_T}^{t_{max}} (n - n_2)^2 h_f[n] \right\} \quad (2.49)$$

où,

- n_1 et n_2 sont les niveaux de gris équivalents aux deux modes de l'histogramme,
- u_T est la valeur de seuil optimale,
- t_{min} et t_{max} sont respectivement les valeurs minimales et maximales des niveaux de gris de l'image (typiquement $t_{min} = 0$ et $t_{max} = 255$).

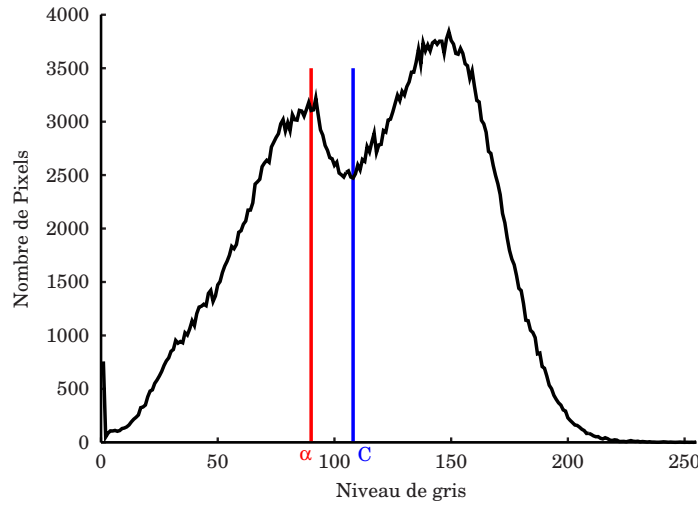


Fig. 2.78: Histogramme de niveaux de gris d'une image de roches présentant deux modes

puis $\alpha = C - b$, où b est une constante qui permet de ne pas perdre l'information des fragments ayant un niveau de gris proche de celui des zones d'ombres. b pourra être fixée pour un ensemble d'images prises sous les mêmes conditions d'éclairage.

Notons que pour une meilleure définition de α , h_f sera calculé plutôt sur l'image pré-filtrée par FAS puis bouchage de trous. Ceci permettra, en effet, d'éviter l'interférence des structures très claires lors de la détermination de C par maximisation de l'entropie entre les classes de niveaux de gris.

Application

La démarche est illustrée par les images (2.79-b), (2.79-d), (2.79-d).

Sur l'image (2.79-j), la prise en compte des zones d'ombre consiste à inclure les zones mises à zéro dans la partition de l'image définie par la LPE.

La même démarche, appliquée à d'autres cas d'images de fragments de roches, montre que le positionnement des contours des fragments est considérablement amélioré (Fig. 2.80, 2.81, 2.82, 2.83 et 2.84).

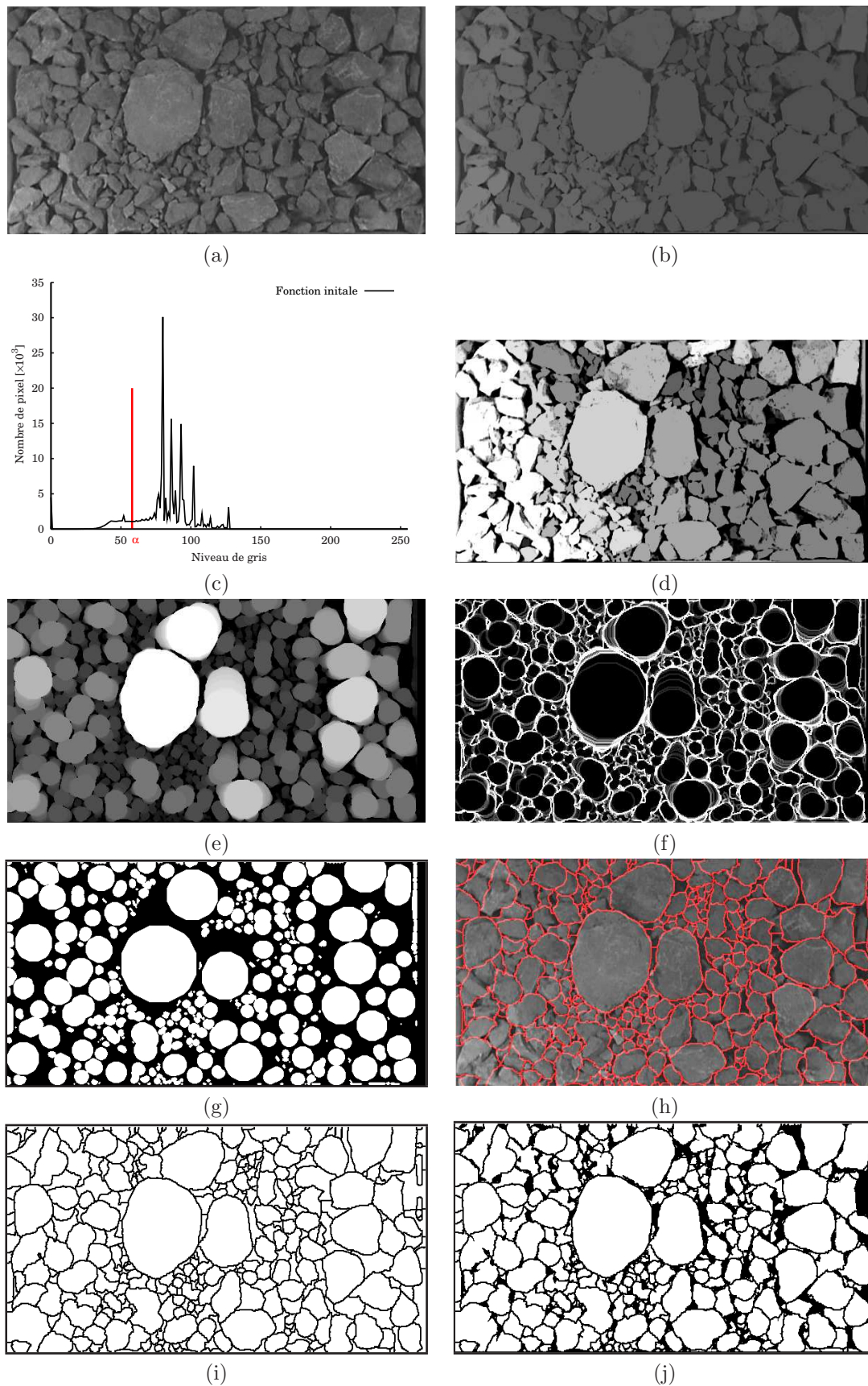


Fig. 2.79: (a) Images initiale, (b) Image pré-filtrée par FAS et bouchage de trous, (c) Histogramme de l'image pré-filtrée et valeur de mise à zéro $\alpha = 58$, (d) Mise à zéro des zones d'ombres de l'image pré-filtrée (multipliée), (e) Fonction granulométrique associée, (f) Gradient de la fonction granulométrique, (g) Boules maximales extraites de la fonction granulométrique, (h) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (i) LPE, (j) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre par seuillage de l'image pré-filtrée

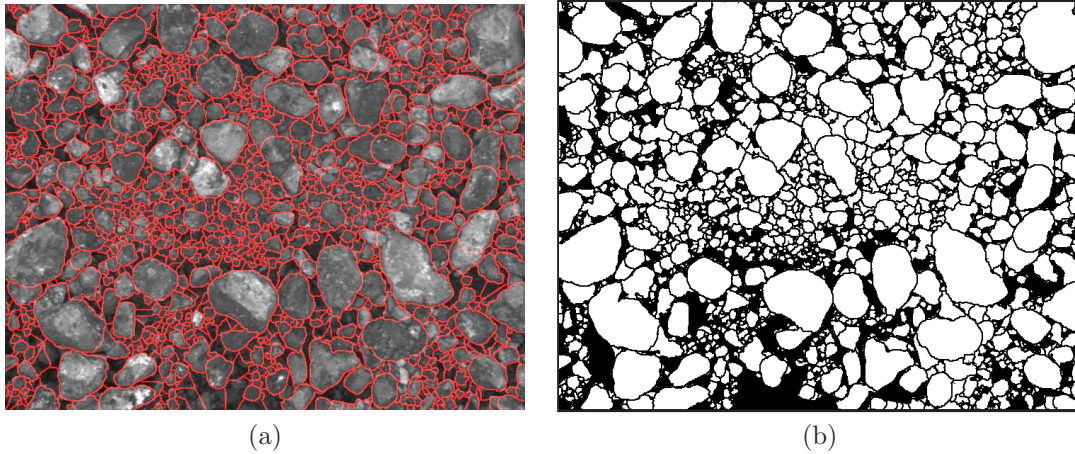


Fig. 2.80: (a) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (b) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre

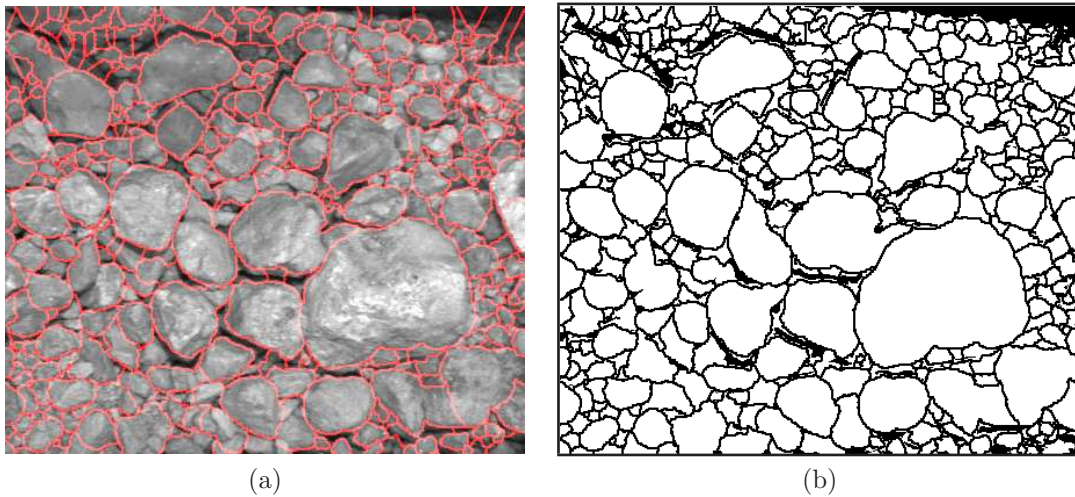


Fig. 2.81: (a) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (b) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre

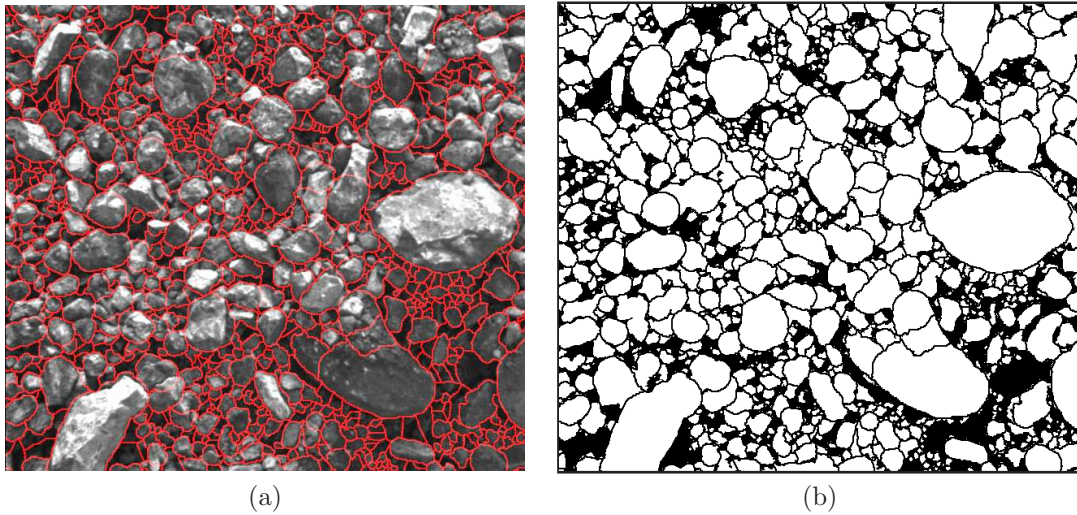


Fig. 2.82: (a) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (b) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre

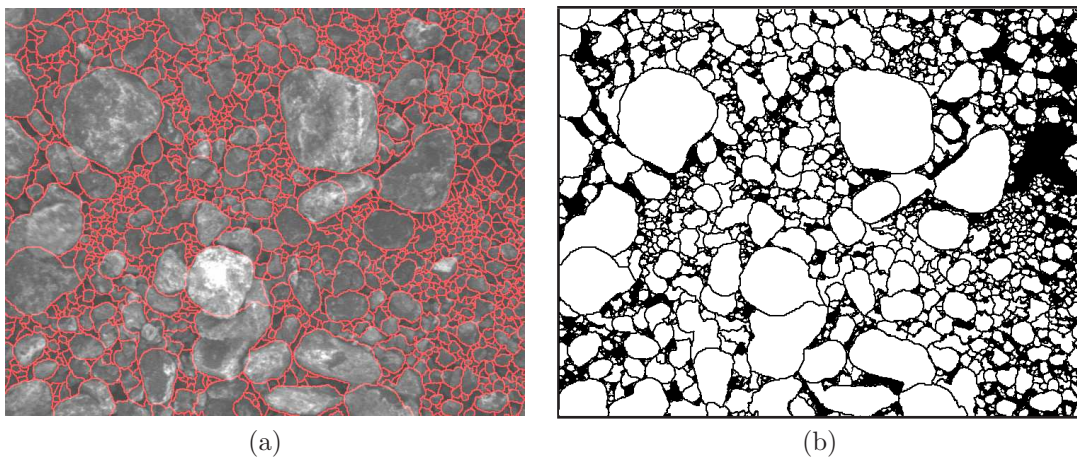


Fig. 2.83: (a) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (b) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre

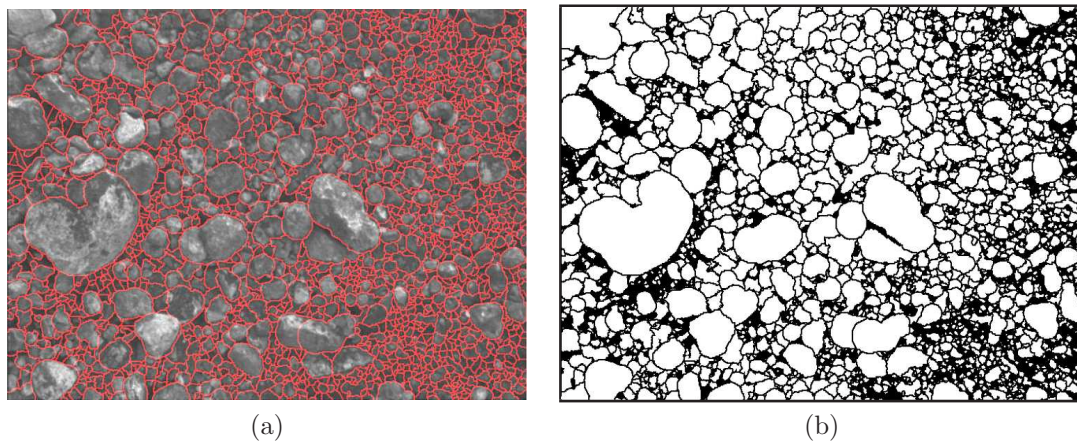


Fig. 2.84: (a) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (b) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre

2.7 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons traité le problème de l'extraction des surfaces des fragments présents dans les images à l'aide d'une nouvelle approche qui combine un filtrage et une extraction des marqueurs, basée sur les transformations résiduelles numériques, avec une segmentation par la ligne de partage des eaux contrôlée.

Nous avons constaté au niveau des analyses bibliographiques et des évaluations de filtres simples que cette étape est entachée d'énormes difficultés dues essentiellement au bruit. Cependant, nous sommes restés motivés par le large potentiel qu'une meilleure extraction des surfaces peut offrir. C'est ainsi que nous avons affronté ce problème dans le but de :

- améliorer l'information obtenue au niveau de cette étape déterminante de la mesure,
- améliorer l'automatisation des traitements (aucun recours au détournage manuel),
- obtenir une information 2D assez pertinente, à travers une segmentation complète sans problèmes de fusion de sur-segmentation, qui permet d'envisager une démarche correcte de reconstruction volumique 3D.

La tâche que nous nous étions fixée a été accomplie avec succès. Comme nous l'avons explicité au cours de ce chapitre, ceci a été rendu possible grâce à une compréhension plus approfondie de l'aspect topographique des images à niveaux de gris des fragments de roches. Aussi, le filtrage, l'extraction des marqueurs et la construction contrôlée de la LPE ont été adaptés à cet aspect.

L'évaluation de la technique de segmentation sur plusieurs images représentant des conditions d'éclairage et de bruits très différentes, a montré qu'elle était très robuste. En effet, l'information des surfaces obtenue est très satisfaisante sur l'ensemble de l'image.

Par ailleurs, une amélioration est à apporter au niveau de quelques fragments allongés qui sont coupés lors de la construction de la LPE (Fig. 2.84). Ceci pourra être envisagé en éliminant tous les contours qui ne correspondent pas à des gradients lumineux, et aussi en étudiant une adaptation plus générale du critère de taille utilisé lors du contrôle des Sup.

Troisième partie

Reconstruction de la granulométrie des roches à partir de l'analyse d'images

Etat de l’art des techniques de reconstruction de la courbe granulométrique à partir des surfaces

*D*e nombreux auteurs se sont intéressés au problème de passage aux volumes pour le cas de la fragmentation des roches. Lors des analyses des résultats obtenus, la représentativité des images manipulées est une notion qui revient souvent. Sans s’intéresser directement aux problèmes liés à la reconstruction des volumes proprement dits à partir des surfaces extraites par traitement d’images, les biais rencontrés sont généralement associés par les auteurs à des problèmes de ségrégation (Ouchterlony, 1990 et Maerz, 1987,1999) [42] [55] et d’échantillonnage (Hunter, 1990 ; Chavez, 1996 et Kemeny, 1999) [8] [24] [30].

Dans ce chapitre, il ne s’agit nullement de présenter en détails les différentes études menées sur le sujet. Nous allons plutôt décrire les techniques de reconstruction adoptées par les auteurs des trois logiciels précédemment cités. Une discussion des limites de ces techniques ainsi que la démarche adoptée dans cette étude concluent ce chapitre.

3.1 Cas de Split : modèle de taille et d’épaisseur

Kemeny *et al.* (1999) [30] dans leur étude de l’amélioration de la détection des particules fines et en se référant à des tests de calibrage avec le tamisage, attribuent à chaque surface de fragment extraite par segmentation, une taille (appelée taille écran) calculée de la façon suivante :

$$Taille_{écran} = \sqrt{Axe_{majeur} \times Axe_{mineur}} \quad (3.1)$$

où Axe_{majeur} et Axe_{mineur} sont les deux axes de l’ellipse dite «*Best fitting ellipse*».

Dans la littérature la «best fitting ellipse» est définie comme étant l’ellipse qui a la même surface que l’élément à approcher et dont les contours représentent le meilleur ajustement par la méthode des moindres carrés aux frontières de l’élément .

Le schéma (3.1) illustre un exemple de fragment avec les tailles calculées par les auteurs.

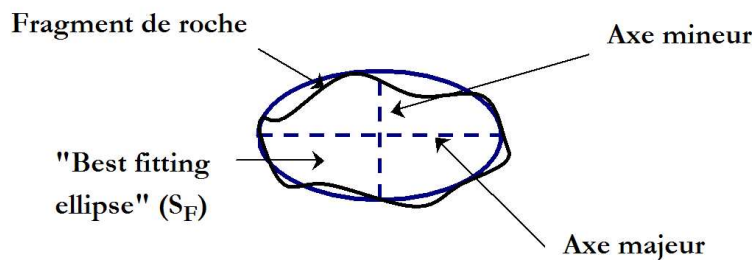


Fig. 3.1: Tailles mises en jeu par le logiciel SPLIT

Le volume du fragment est ensuite donné par :

$$Volume_{fragment} = Taille_{écran} \times Surface_{fragment} \quad (3.2)$$

Nous pouvons noter que, calculé par cette méthode, le volume peut aussi s'écrire sous la forme :

$$Volume_{fragment} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times Surface_{fragment}^{3/2} \quad (3.3)$$

De plus, si l'on considère le cercle de même surface que l'ellipse, il en découle que la taille attribuée au fragment par l'auteur n'est autre que le diamètre de ce cercle.

$$Taille_{écran} = Diamètre_{Cercle\ équivalent} \quad (3.4)$$

De même que pour la taille, si nous raisonnons sur le cercle (diamètre d) de même surface que le fragment, le volume est égal à :

$$Volume_{fragment} = \left(\frac{\sqrt{\pi}}{4} \right) \times d^3 \quad (3.5)$$

De ce qui précède, il ressort qu'il n'est pas essentiel de passer par l'ellipse, et ce, que ce soit pour le calcul des tailles ou des volumes.

L'auteur mentionne par ailleurs que les problèmes dus au chevauchement entre fragments (masquage partiel des surfaces apparentes) et à l'épaisseur de recouvrement (non-accessibilité de toute la granularité lors de l'acquisition) sont pris en compte pendant le calcul de l'histogramme des refus volumiques. Néanmoins, la démarche de correction des erreurs relatives au recouvrement et au chevauchement n'est pas spécifiée par l'auteur.

3.2 Cas de Wipfrag : fonction de reconstruction

Maerz *et al.* (1996) dans [38] utilisent les équations basées sur les travaux de Santalo (1976) [61] dans le domaine de la *probabilité géométrique* (dite aussi *géométrie intégrale*).

Dans ses travaux sur la stéréologie appliquée au domaine de la fragmentation des roches, l'auteur ne rentre pas dans les détails de la démarche théorique développée par Santalo, mais pour définir la probabilité géométrique, il donne l'exemple de la probabilité qu'un ensemble de particules distribuées aléatoirement puisse être intercepté par une droite ou un plan donné.

Les différents intercepts calculés permettent d'établir une distribution granulométrique de tailles ou de surfaces (en fonction de l'élément qui intercepte les particules, droite ou plan), notée $h(s)$ pour le cas de ces dernières. L'étude menée par l'auteur tente de relier $h(s)$ à la vraie distribution granulométrique notée $H(l)$ moyennant une fonction dite *de reconstruction*, nommée «*unfolding function*».

Attirant l'attention sur la difficulté d'opérer correctement cette reconstruction à cause de la forme non convexe des fragments et de l'angle particulier d'intersection permis par l'acquisition, il affirme qu'il est essentiel d'émettre des hypothèses simplificatrices. D'une part, l'intersection par le plan (ou la droite) est supposée aléatoire. D'autre part, les fragments sont supposés convexes et sont aussi distribués aléatoirement. Enfin, sans préciser, l'auteur mentionne aussi qu'une hypothèse est émise quant à l'allure de la distribution granulométrique (forme de la fonction $H(l)$) et à la forme des fragments.

Les études théoriques sont conduites pour des particules de formes assez simples (sphères, cubes, ellipsoïde...) et les solutions exactes sont établies pour le cas particulier des sphères.

Selon l'auteur, le nombre théorique de particules N_A par unité de surface interceptées par un plan est donné par :

$$N_A = \frac{M}{2\pi} N_V \quad (3.6)$$

où N_V est le nombre de particules par unité de volume et M est l'intégrale de courbure moyenne des particules. Pour le cas des sphères M est égale à $2\pi d$ et l'équation précédente se réduit à :

$$N_A = d N_V \quad (3.7)$$

Concernant les distributions de fragments de roches, l'auteur leur attribue en premier lieu une forme sphérique. Il suppose ensuite que si $h(s)$ est divisée en un nombre de classes de largeurs égales, alors pour chaque classe :

$$N_V(d) = \frac{1}{d} N_A(d) \quad (3.8)$$

où d est le diamètre moyen de la classe.

Le fait que l'information des surfaces telle qu'elle est obtenue par traitement d'images (projection) ne peut correspondre à celle obtenue à la suite d'une coupe, amène l'auteur à faire des séries de calibrages (basés sur des granulométries de balles sphériques en caoutchouc) lui permettant de calculer un coefficient de calibrage $f(d)$ introduit dans l'équation précédente comme

suit :

$$N_v(d) = \frac{1}{d \cdot f(d)} N_A(d) \quad (3.9)$$

D'après l'auteur, pour chaque classe, le coefficient $f(d)$ est supposé prendre en compte les biais dus au recouvrement, aux fines non détectées lors des traitements d'images et à l'influence de l'étalement de la distribution sur la vraie forme de la courbe granulométrique (biais dus à l'impact de l'étalement sur l'information disponible en surface pour le traitement des images).

Enfin, en se basant sur une étude expérimentale de trois types de granulométries (dont la forme est contrôlée : une distribution exponentielle négative et deux distributions log-normales), il conclut que les valeurs du coefficient $f(d)$ sont de l'ordre de 1 sauf pour les classes constituant les extrémités de la granulométrie (fines et grandes tailles).

En ce qui concerne la méthode décrite par l'auteur, nous pouvons noter les remarques suivantes :

- la démarche tente de relier la courbe granulométrique mesurée par tamisage, prise comme référence, à une distribution granulométrique représentant des sphères,
- les conditions ainsi que les biais que le coefficient $f(d)$ semble prendre en compte changent souvent, d'un tas à l'autre, d'un échantillon à l'autre, mais aussi et surtout d'une image à l'autre (selon les dispositions des fragments entre eux qui varient avec l'étalement et les formes des fragments),
- par ailleurs, l'équation (3.9) indique que le nombre d'intercepts par unité de surface est plus grand que le nombre total des fragments par unité de volumes. Cet énoncé semble illogique et n'est toutefois pas argumenté par l'auteur, De plus le raisonnement basé sur une stéréologie de coupe semble difficilement transposable au cas des surfaces projetées disponibles par acquisition d'images. En effet, le nombre de surfaces considérées est différent selon qu'on raisonne en coupe ou en projections. Ce dernier fait semble particulièrement compromettre la robustesse du coefficient $f(d)$,
- enfin, l'auteur est peu explicite quant au concept de taille adopté pour le traitement d'image.

3.3 Cas de FragScan : modèle des sphères

Dans la démarche précédente du logiciel (Chavez, 1996 et Schleifer 2001) [8] [63] [64], la granulométrie en volume est calculée en se basant sur le modèle dit des sphères. Avec l'information des contours partiels, le raisonnement est basé sur la notion de classe. La surface de la classe obtenue après deux ouvertures successives (de tailles μ_{i-1} et μ_i , figure 3.2) est supposée représenter la projection de n_i sphères de diamètre d_i représentant la taille de la classe.

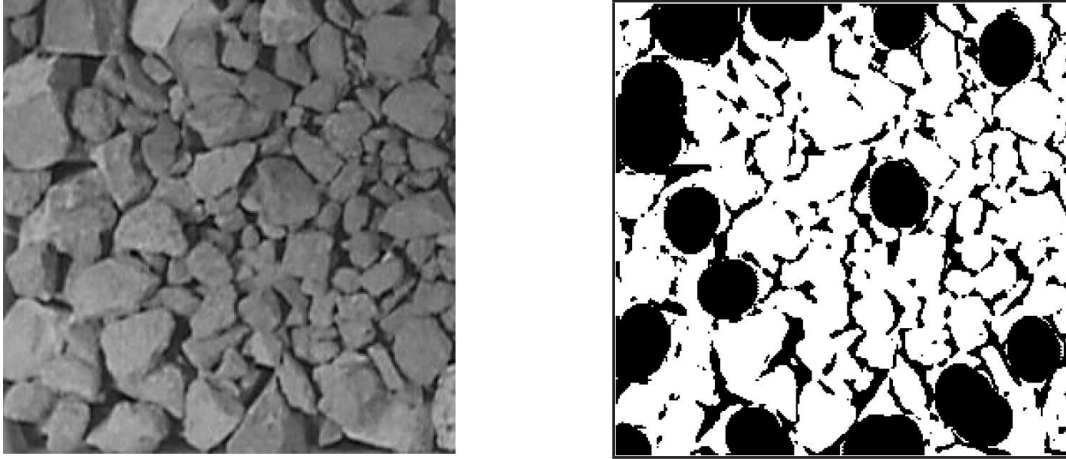


Fig. 3.2: Ouverture de taille $\mu = 30$ opérée sur l'image binaire (les zones blanches correspondent à la surface passante)

$$Taille_{classe i} = d_i = \frac{\mu_{i-1} + \mu_i}{2} \quad (3.10)$$

$$S_i = S_{\mu_i} - S_{\mu_{i-1}} \quad (3.11)$$

Le volume de la classe $[\mu_{i-1} ; \mu_i]$ est donné par :

$$V_i = n_i \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_i}{2}\right)^3 \quad (3.12)$$

Des corrections sont utilisées par rapport aux problèmes de ségrégation et de groupement (Chavez et al, 1996) [9] ainsi que les erreurs dues à la manipulation de contours partiels. Des calibrages sont ensuite effectués, pour le cas de distributions étalées, pour la prise en compte particulière des fines particules incorrectement détectées par traitement d'images.

3.4 Discussion et démarche adaptée

Des sections précédentes, l'idée principale que nous pouvons retenir est qu'il est essentiel d'améliorer l'étape de la reconstruction de la courbe volumique. En effet, les méthodes de calibrage citées semblent fournir des coefficients correctifs finaux qui prennent en compte, en même temps, des problèmes de natures très différentes. Ils cherchent ainsi à la fois :

- à intégrer un calibrage indispensable par rapport aux problèmes de ségrégation, de recouvrement et de chevauchement ;
- et à remédier aux défauts intrinsèques du traitement d'images notamment la fusion et la sur-segmentation, et les modèles d'attribution des tailles et des volumes.

Par ailleurs, une démarche consistant à donner une forme à l'objet, avant de le mesurer (approximation sphérique), ne s'avère pas très concluante et nécessite des calibrages ultérieurs.

Enfin, la théorie développée pour la stéréologie de coupes n'est pas valable pour le cas des images de fragments de roches. Le nombre de surfaces considérées diffère selon qu'on raisonne en projection ou en coupe.

Par ailleurs, le tamisage étant la référence actuelle de la mesure, la démarche expérimentale du calibrage est essentielle.

La démarche proposée, basée sur un raisonnement en projection, consiste à faire la différence dorénavant entre deux principaux problèmes :

- d'une part, la reconstruction proprement dite qui consiste à remonter exclusivement à la granulométrie volumique des fragments présents à l'image et non à celle d'un hypothétique tas. Ainsi, afin d'éviter l'interférence des problèmes antérieurement cités, nos traitements seront effectués, en premier lieu, sur des images de fragments sans chevauchement et sans recouvrement (chapitre 4). Deux méthodes, l'une basée sur le calcul des proportions et l'autre sur la comparaison des refus, seront examinées.
- D'autre part, la résolution des problèmes liés à l'échantillonnage. En effet, les couches des fragments ne sont pas «formées» suivant le même processus (ségrégation lors de la chute lors du tir ou lors du déversement dans les engins). La notion de représentativité des couches mesurées n'est pas vérifiée. Une démarche d'inférence directe des caractéristiques des autres couches en se basant sur les mesures effectuées sur la première couche ne peut donc être pertinente. Il est essentiel d'introduire des hypothèses sur la formation du tas étudié pour pouvoir effectuer correctement cette étape d'inférence.

Nous nous sommes intéressés, essentiellement, dans le cadre de cette thèse au problème causé par la présence d'un faible recouvrement et chevauchement (cas du convoyeur à bande). L'objectif est de remonter à l'information sous-jacente des caractéristiques des surfaces étudiées. Une première utilisation de la théorie des modèles de structures aléatoires pour le cas des fragments de roches sera testée (chapitre 5).

Passage du 2D au 3D pour le cas de non-recouvrement et non-chevauchement

Après avoir extrait les surfaces des fragments, l'étape suivante est axée sur la reconstruction de la courbe granulométrique. Lors du découpage de la problématique (section 1.4.2) nous avons attiré l'attention sur l'importance de la séparation, dans les traitements, entre les types d'images selon l'endroit d'acquisition. Le premier cas étudié dans cette thèse est celui des images acquises sur convoyeur à bande. Lorsqu'on considère la vitesse de transport du matériau sur la bande et celle de sa chute sur cette dernière, c'est la différence entre ces deux vitesses qui déterminera la nature du recouvrement et du chevauchement que subiront les fragments. Ainsi une vitesse de transport supérieure à celle de la chute des fragments donnera un faible recouvrement et chevauchement et vice-versa.

*Ce chapitre traite le cas de l'**absence** de ces deux problèmes. Nous testons en premier lieu la méthode dite d'anamorphose. Habituellement cette dernière tente de relier les proportions volumiques de la granulométrie calculées par analyse d'images à celles de l'ensemble du tas abattu. Les résultats et les limites de l'utilisation de la méthode sont examinés.*

Ensuite, une nouvelle démarche basée sur la comparaison des classes surfaciques obtenues par analyse d'images à celles du tamisage est introduite. La nouvelle méthodologie de reconstruction est formulée mathématiquement et la démarche pratique est expliquée. Enfin, la méthode est testée et validée expérimentalement.

4.1 Présentation des échantillons expérimentaux

Nous présentons dans cette section les quatre lots d'images expérimentales sur lesquels nous avons conduit nos calculs de reconstructions granulométriques. Les images étudiées sont caractérisées par le fait que l'ensemble des fragments est entièrement accessible à l'acquisition.

Les premières images sur lesquelles nous nous sommes basés sont celles qui ont été construites suite aux travaux de *J.-P.Latham* (lot N°1). Les autres lots d'images, préparés au *Centre de Géosciences* par nos soins, concernent deux types de roches :

- Une partie constituée de schistes provenant de la mine de *Merlebach* située dans le bassin de la *Lorraine* (Lot N°2) ;
- l'autre de gneiss provenant d'un tir à l'explosif à la carrière de la *Clarté* du groupe *CHARIER C.M.* Ils ont été utilisés par le passé lors de la thèse de T.Shriar (1996) [72] (Lot N°3 et N°4).

Les données des refus massiques équivalents aux quatre lots images sont regroupées dans le tableau (4.1), page 119.

4.1.1 Lot d'images N°1 : images J.-P. LATHAM

Le premier lot étudié concerne les neuf images provenant du *Department of Engineering* du *Queen Mary & Westfield College* (J.-P.Latham (1993)). Chacune des images, P01, P09..., a été construite de telle façon à ce que :

- les fragments soient disposés sur une seule couche avec un très faible chevauchement ;
- et la distribution des tailles mesurée par tamisage (environ 30 kg par image) suit spécialement le modèle mathématique de Rosin-Rammler, que nous avons introduit dans le premier chapitre (section 1.2.3), avec un jeu de paramètres n et X_c donné (Fig. 4.1 et 4.2).

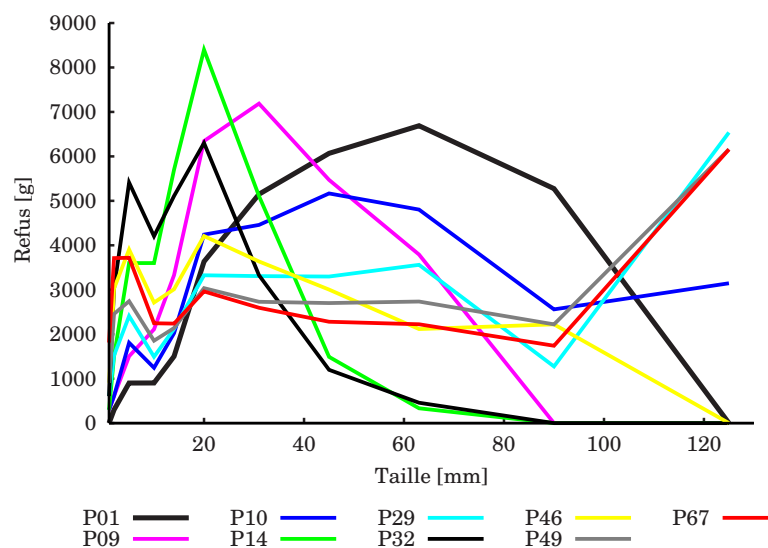


Fig. 4.1: Refus massiques de l'ensemble des images du lot N°1

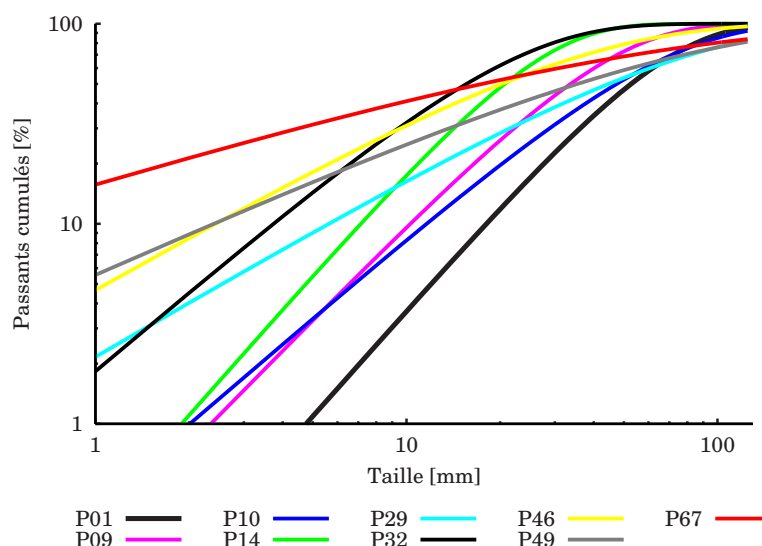


Fig. 4.2: Courbes granulométriques de l'ensemble des images du lot N°1

4.1.2 Lot d'images N°2

Le deuxième lot construit au CGES (2004, 2005) concerne des fragments issus exclusivement d'un concassage de schistes noirs provenant de la mine de Merlebach située en Lorraine.

Une masse totale de 9050 g a été passée dans douze tamis dont la taille des mailles varie entre 2 et 25 mm (figure 4.3). Les refus massiques équivalents aux différentes classes de tailles ont été choisis de façon à ce que la distribution totale suive aussi le modèle de Rosin-Rammler ($X_{c3D} = 14,73$ mm et $n_{3D} = 2,5$, Fig. 4.4).

Après tamisage, les fragments ont été mélangés puis étalés sur une seule couche sans qu'ils ne se chevauchent (aucune information sous-jacente inaccessible à l'acquisition), donnant lieu à dix images (mosaïque). Chacune des images représente ainsi une partie de l'échantillon. La distribution des tailles considérée lors des traitements, pour ce second lot, est celle qui correspond à l'ensemble des dix images (tas).

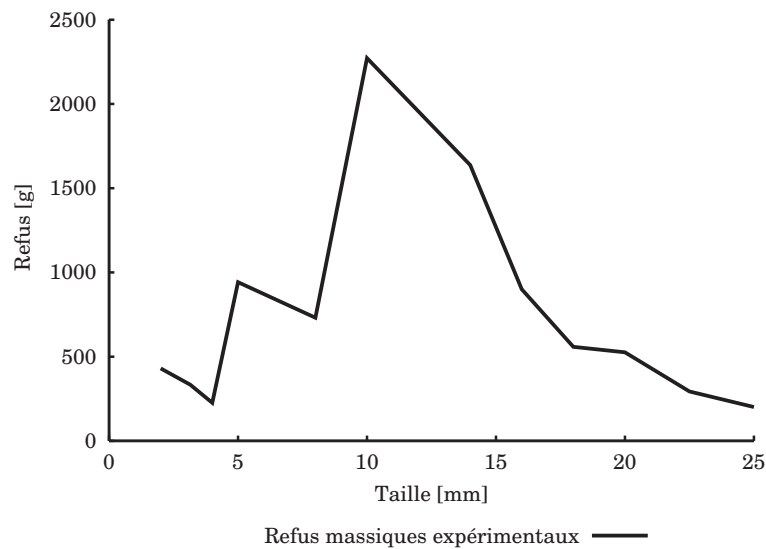


Fig. 4.3: Refus massiques du lot N°2

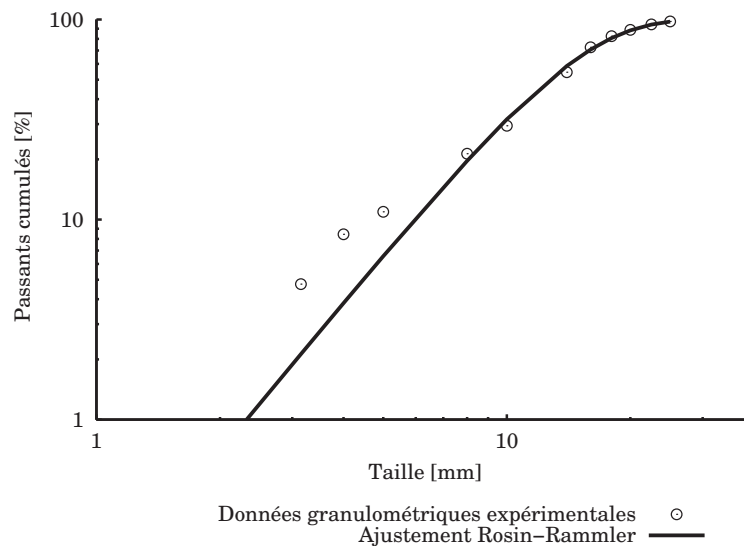


Fig. 4.4: Courbe granulométrique du lot N°2

4.1.3 Lot d'images N°3

Pour ce troisième lot de gneiss (CGES, 2005), il ne s'agit pas d'une granulométrie ajustée au modèle de Rosin-Rammler. Le lot concerne plutôt un ensemble de classes de tailles $[3, 15 \text{ mm} ; 63 \text{ mm}]$, d'une masse d'environ 19 kg , dont le contenu de chaque classe a été pesé et acquis séparément. Ainsi pour chaque classe individuelle, les deux distributions de tailles établies par analyse d'images et par tamisage sont connues. Les conditions de disposition des fragments étant identiques aux cas précédents.

Suite à ces manipulations nous avons obtenu quinze images représentant chacune une classe de taille individuelle (figure 4.5). Notons, en ce qui concerne cette description expérimentale,

que l'intérêt de cette construction particulière répond d'un intérêt de modélisation que nous expliciterons plus loin dans ce chapitre (sous-section 4.4.3).

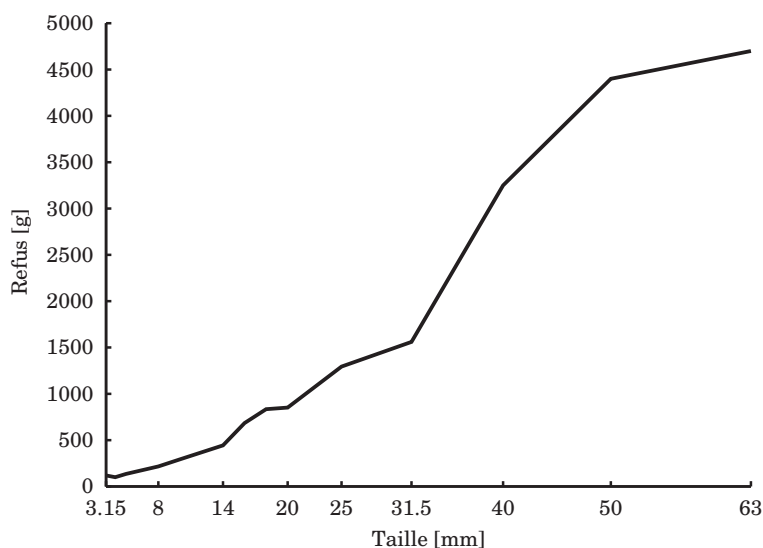


Fig. 4.5: Refus massiques pour les classes individuelles du lot N°3

4.1.4 Lot d'images N°4

Le quatrième lot de sept images (CGES, 2005) représente le même type de roche que l'échantillon N°3, pour lequel la majeure partie de la fragmentation est issue d'un tir à l'explosif, et une partie correspond à un produit concassé. Tous les fragments sont aussi entièrement accessibles à l'acquisition et l'ensemble de la distribution de tailles étudiée, qui correspond au mélange de toutes les classes tamisées, suit le modèle Rosin-Rammler, avec comme paramètres : $n_{3D} = 1,48$ et $X_{c3D} = 24,66$ mm (27 kg) (Fig. 4.6).

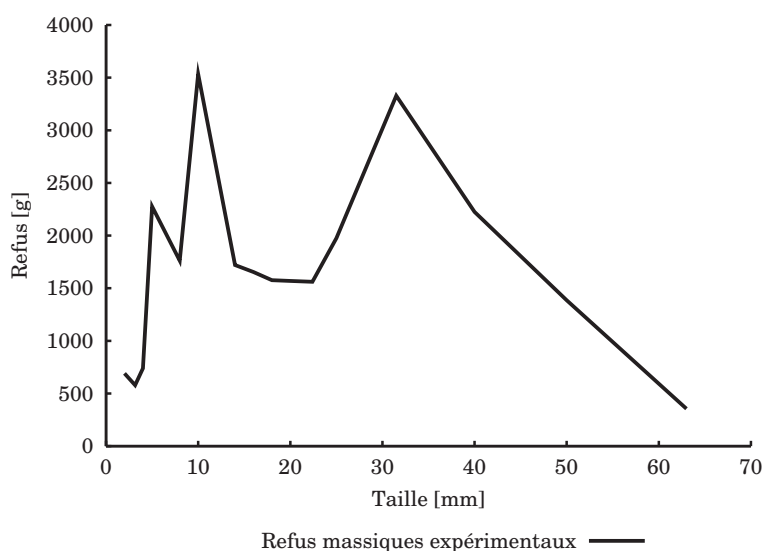


Fig. 4.6: Refus massiques du lot N°4

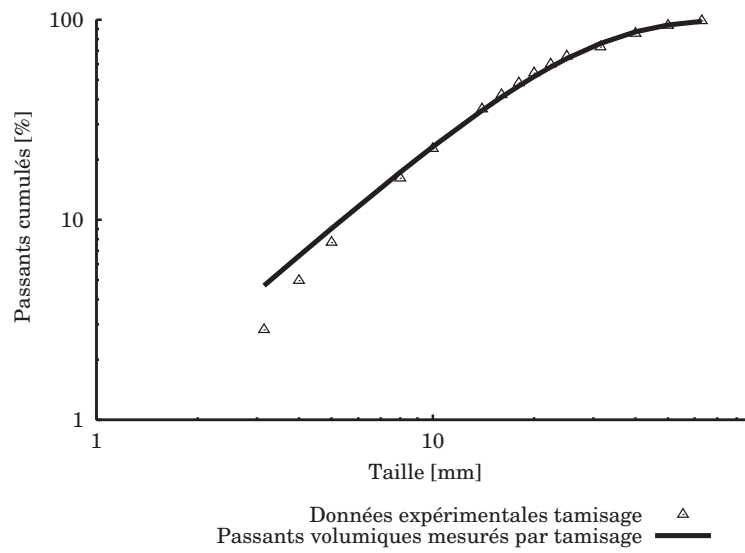


Fig. 4.7: Courbe granulométrique du lot N°4

Lot N°1 (Neuf images)													Lot N°2		Lot N°3		Lot N°4	
Image	P01	P09	P10	P14	P29	P32	P46	P49	P67				Neuf images	Quinze images	Sept images			
Données du modèle d'ajustement de Rosin-Rammeler																		
n_{3D}	1,76	1,59	1,34	1,77	0,91	1,32	0,89	0,70	0,49				2,5	/		1,5		
X_{c3D} [mm]	64,95	42,42	62,29	25,45	66,81	20,57	30,51	59,79	36,91				14,73	/		25		
Données granulométriques																		
Maille [mm]		Refus (g)										Maille [mm]		Refus (g)				
125	0	0	3145	0	6537	0	0	6160	6157	63		/		4700		355		
90	5275	0	2558	0	1275	0	2222	2222	1741	50		/		4400		1386		
63	6690	3791	4803	334	3560	459	2116	2735	2223	40		/		3250		2225		
45	6069	5472	5167	1490	3298	1199	3004	2701	2280	31,5		/		1560,4		3328		
31,5	5149	7187	4459	5108	3306	3325	3636	2729	2595	25		201		1294		1975		
20	3634	6345	4241	8399	3326	6302	4209	3036	2963	22,4		293,4		232,6		1561		
14	1502	3330	2022	5700	2120	5110	3011	2138	2239	20		525,6		851,3		1569		
10	903	2110	1244	3600	1492	4204	2712	1855	2247	18		558,4		834		1576		
5	901	1504	1809	3600	2410	5411	3905	2742	3719	16		900,1		684,7		1654		
2	300	608	608	1500	1521	3021	3026	2457	3713	14		1637,3		443,1		1720		
1	0	300	300	300	607	607	905	907	1812	10		2272,1		292,5		3534		
<1	0	0	0	0	600	600	1500	1800	6000	8		731,1		216,7		1762		
										5		942		135		2276		
										4		226		100		739		
										3,15		333,3		118,7		579		
										2		430,4		/		691		

TAB. 4.1: Refus massiques des quatre lots d'images

4.2 Concept de taille et méthode de tri pour les données 2D

Dans cette section nous allons décrire le concept de taille adopté lors des calculs relatifs à l'analyse d'images.

Les contours extraits par analyse d'images donnent accès aux surfaces projetées des fragments. Les tentatives d'attribution préalable de tailles intrinsèques à ces surfaces ne sont pas concluantes et nécessitent des corrections lors des calibrages avec le tamisage (cf. chapitre 3).

Lorsqu'on s'intéresse de près à ce problème de concept de taille, on peut remarquer que le tri par tamisage prend en compte toute la forme du fragment (notamment son volume). Or en ce qui concerne l'analyse d'images, la méthode d'acquisition actuelle (images à niveaux de gris) ne donne accès qu'à la surface projetée de ce dernier.

Le schéma 4.8 montre que, lorsqu'on se compare exclusivement au tamisage, il est très difficile de statuer sur la **maille** qu'il faut affecter à la surface extraite par analyse d'images.

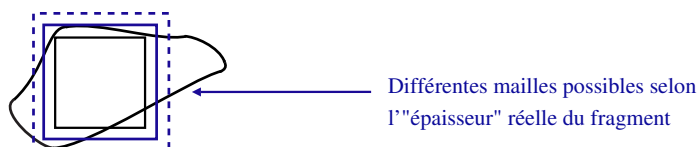


Fig. 4.8: Difficulté d'accès à la taille tamisage pour une surface du fragment

Dans notre démarche, la taille que nous affectons à la surface est **le diamètre du cercle maximal** inscrit à l'intérieur de cette dernière (schéma 4.9). Il ne s'agit pas d'un concept de taille proprement dit mais plutôt d'une méthode de tri. Dans ce premier stade de résolution, les surfaces seront ainsi caractérisées par des tailles 2D : r_{2D} . Le critère choisi permet ainsi une discrimination isotrope des surfaces.

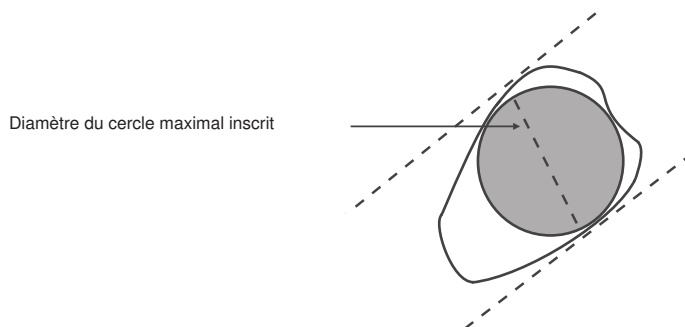


Fig. 4.9: Critère de tri des surfaces adopté

Par traitement d'images, cette taille est accessible à travers l'ouvert maximal. En effet, le tri est opéré moyennant des ouvertures par reconstruction successives. La taille de l'ouverture qui fait disparaître le fragment est précisément égale au diamètre du cercle maximal inscrit.

En ce qui concerne les surfaces triées, elles sont rangées en tant que **refus surfaciques** (ou refus 2D) dans les classes de tailles r_{2D} . Puis, les mêmes calculs menés habituellement sur les refus volumiques peuvent être effectués sur les refus surfaciques.

Dans les sections qui suivent, nous calculons les **proportions surfaciques** (ou passants 2D) que nous ajustons au même modèle mathématique qui décrit la granulométrie en 3D.

Dans ce qui suit, les paramètres relatifs au tamisage et à l'analyse d'images seront notés respectivement avec les indices 3D et 2D. Les données relatives au tamisage seront aussi appelées données de **référence**.

4.3 Méthode de reconstruction par anamorphose établie sur les passants cumulés

4.3.1 Principe de la méthode

La première méthode de reconstruction testée est la méthode dite d'anamorphose. Elle consiste à déterminer la fonction de transfert qui relie deux courbes différentes.

Habituellement cette anamorphose est utilisée lors des calibrages des passants cumulés issus de l'analyse d'images pour remonter à ceux représentant l'ensemble du tas abattu. Les deux courbes granulométriques sont censées décrire le même phénomène.

Dans notre démarche, nous calculons l'anamorphose qui permet de relier l'information des surfaces à celle des volumes pour la même distribution de tailles.

Notre objectif est de tester l'applicabilité de cette fonction à de nouveaux échantillons de distributions différentes issues de la même roche et acquises sous les mêmes conditions.

Si on considère les modèles d'ajustement des données expérimentales issues de l'analyse d'images et du tamisage, la fonction anamorphose Q peut être calculée analytiquement comme suit :

$$G(r) = F(Q(r)) \quad (4.1)$$

où G et F sont les deux courbes d'ajustement des proportions volumiques et surfaciques (ou passants cumulés surfaciques) issues respectivement du tamisage et de l'analyse d'images, r étant la taille des éléments.

En pratique, deux cas de figures se présentent, en fonction de l'évolution des deux courbes (figures 4.10 et 4.11).

4.3.2 Calcul de l'anamorphose pour le cas du modèle de Rosin-Rammler

Dans la section 4.1, nous avons vu que, mis à part le lot $N^{\circ}3$, les autres lots tamisés suivent tous le modèle de Rosin-Rammler pour les granulométries volumiques. Lorsque les proportions surfaciques suivent le même modèle, nous avons accès aux quatre paramètres Xc_{2D} , n_{2D} , Xc_{3D} et n_{3D} .

Pour une taille r donnée, la fonction anamorphose $Q(r)$ doit vérifier la relation suivante :

$$P_{3D}(r) = P_{2D}(Q(r)) \quad (4.2)$$

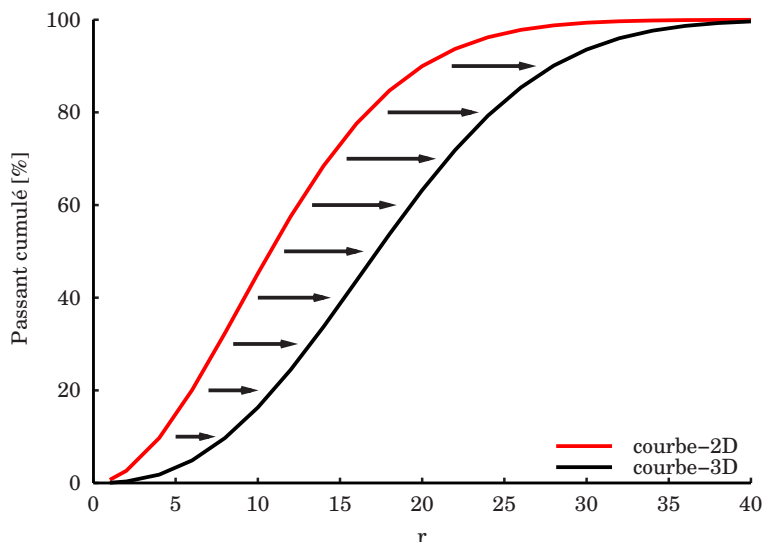


Fig. 4.10: Passage au 3D par anamorphose : premier cas de figure

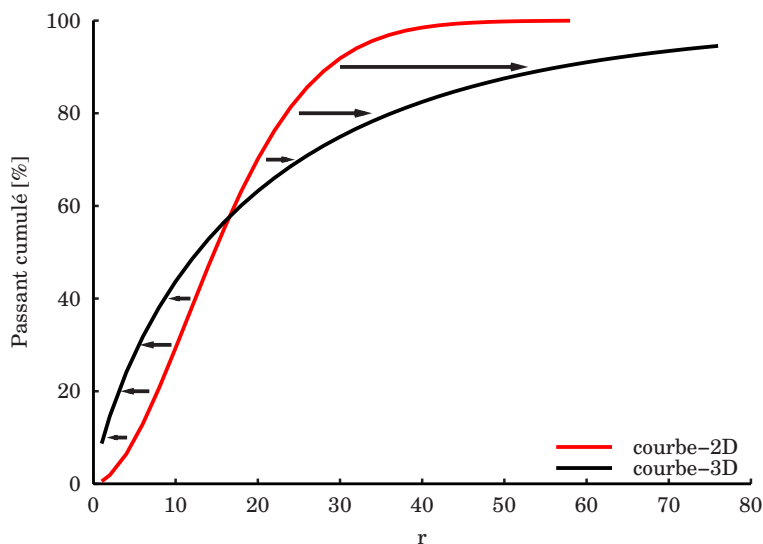


Fig. 4.11: Passage au 3D par anamorphose : deuxième cas de figure

où P_{3D} et P_{2D} sont respectivement les passants volumiques et surfaciques. Ces deux derniers étant deux Rosin-Rammler, la fonction Q est nécessairement une fonction puissance.

Sachant que lorsque les deux passants cumulés sont égaux, alors les deux tailles r_{2D} et r_{3D} équivalentes sont liées par la relation suivante :

$$r_{2D} = X_{c2D} \left(\frac{r_{3D}}{X_{c3D}} \right)^{\frac{n_{3D}}{n_{2D}}} \quad (4.3)$$

Il en découle que la fonction Q s'écrit sous la forme :

$$Q(r) = X c_{2D} \left(\frac{r}{X c_{3D}} \right)^{\frac{n_{3D}}{n_{2D}}} \quad (4.4)$$

$$= k r^\alpha \quad (4.5)$$

Le raisonnement basé sur les passants (figure 4.10) au lieu des tailles pour l'établissement de l'anamorphose permet d'éviter le problème de l'étalement différent des deux granulométries (figure 4.12). En effet, contrairement aux passants cumulés maximaux, les deux tailles maximales ne sont pas égales pour les deux méthodes de tri.

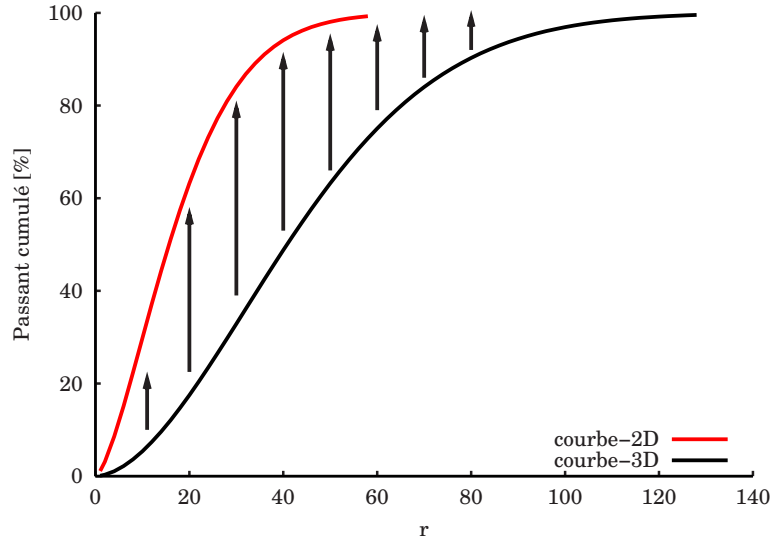


Fig. 4.12: Passage par anamorphose : problème de différence d'étalement

En somme, dans la pratique nous pouvons procéder comme suit :

- Les mesures sur l'échantillon calibré permettent d'obtenir k et α .
- Puis pour les autres cas où seul P_{2D} est accessible, l'estimation de P_{3D} est calculée par :

$$P_{3D}^*(r) = P_{2D}(k r^\alpha) \quad (4.6)$$

Une telle démarche peut être validée lorsque l'anamorphose est stable et permet d'obtenir des courbes granulométriques en volume correctes.

4.3.3 Application de l'anamorphose aux échantillons expérimentaux

Dans la section suivante, nous présentons les résultats des calculs des anamorphoses sur les deux premiers échantillons.

Dans ce qui suit, l'intégralité des images binaires représentant les résultats des traitements 2D ainsi que les valeurs des refus surfaciques mesurés par analyse d'images sont présentées dans la section (1) des annexes.

4.3.3.1 Résultats du lot N°1

Afin de tester l'applicabilité de la méthode d'anamorphose sur ce premier échantillon, nous avons procédé à trois différents tests : A, B et C.

A - Premier cas : images individuelles

En premier lieu, les ajustements des proportions surfaciques ainsi que les courbes d'anamorphose ont été établis pour chacune des neuf images étudiées.

Traitements 2D

Les paramètres n_{2D} et X_{c2D} de Rosin-Rammler, issus des ajustements quadratiques (section 1.2.3.2), et ceux de l'anamorphose k et α (Eq.4.5) sont présentés dans le tableau 4.2.

	Images								
Images	P01	P09	P10	P14	P29	P32	P46	P49	P67
Rosin-Rammler									
n_{2D}	2,01	2,11	1,69	2,27	1,19	2,15	1,75	1,17	0,92
X_{c2D} [mm]	64,98	40,77	52,65	28,18	62,07	27,76	37,15	56,91	47,76
Anamorphose									
k	1,68	2,43	1,99	2,27	2,49	4,32	5,36	5	6,88
α	0,88	0,75	0,79	0,78	0,77	0,62	0,57	0,59	0,54

TAB. 4.2: Paramètres surfaciques et paramètres d'anamorphose du lot N°1

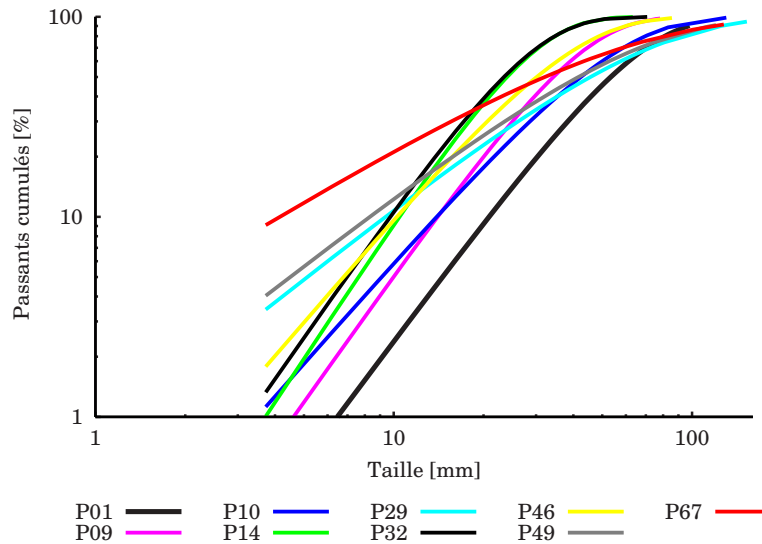


Fig. 4.13: Passants cumulés surfaciques des images du lot N°1

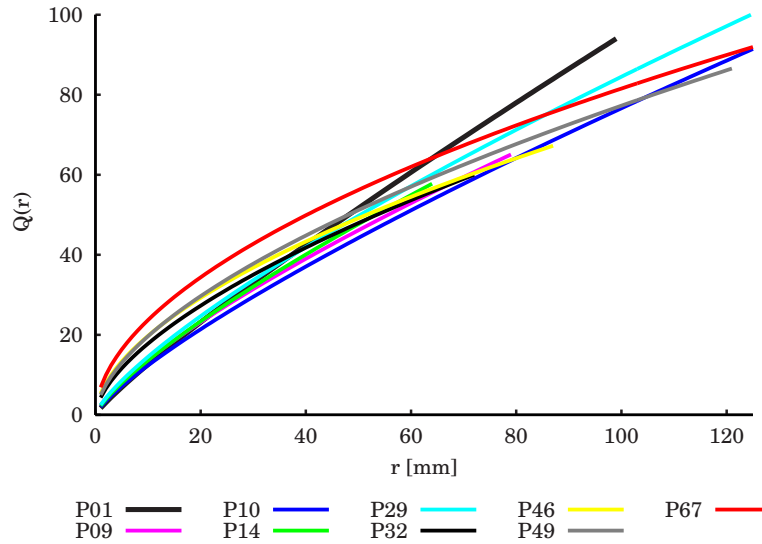


Fig. 4.14: Anamorphoses relatives aux images du lot N°1

Test d'anamorphose

Pour ce premier test, l'image $P10$, caractérisée par un étalement moyen ($n = 1,34$ et $X_c = 62,29 [mm]$), a été prise comme granulométrie supposée de calibrage. Les estimations des proportions volumiques (P_{3D}^*) des autres images sont calculées en se basant sur l'équation (4.6) (figure 4.15), puis comparées aux granulométries de référence (avec pour l'image $P10$, $k = 1,99$ et $\alpha = 0,79$).

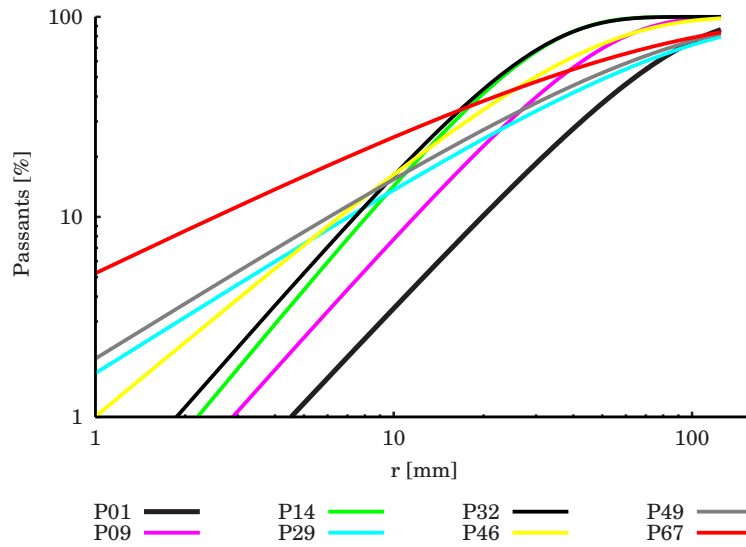


Fig. 4.15: Granulométries volumiques issues de l'anamorphose utilisant les facteurs de $P10$

La comparaison de ces résultats avec les courbes de références issues du tamisage est illustrée par les figures 4.16, 4.17 et 4.18.

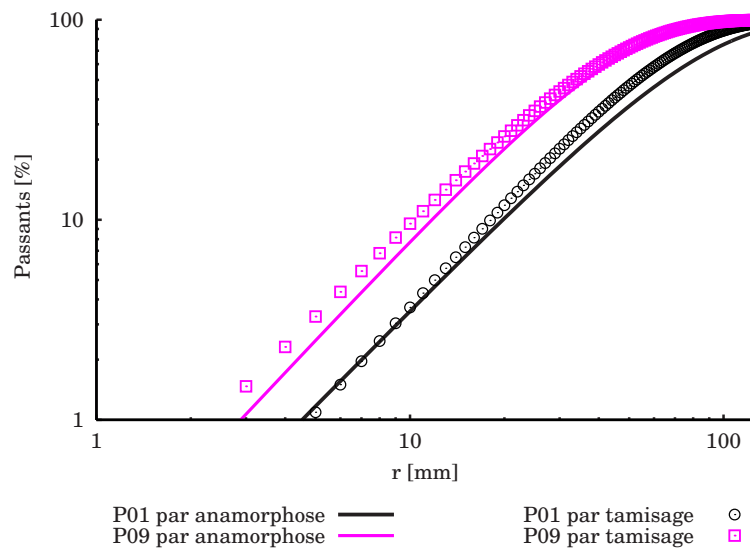


Fig. 4.16: Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs de P_{10}

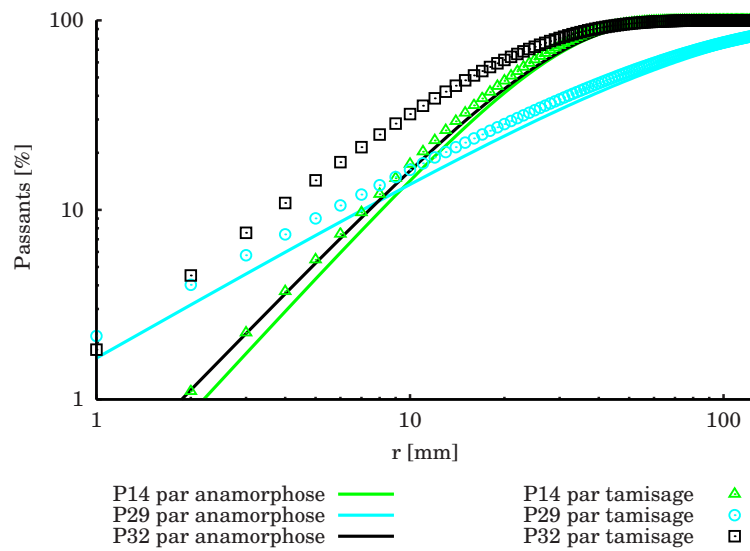


Fig. 4.17: Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs de P_{10}

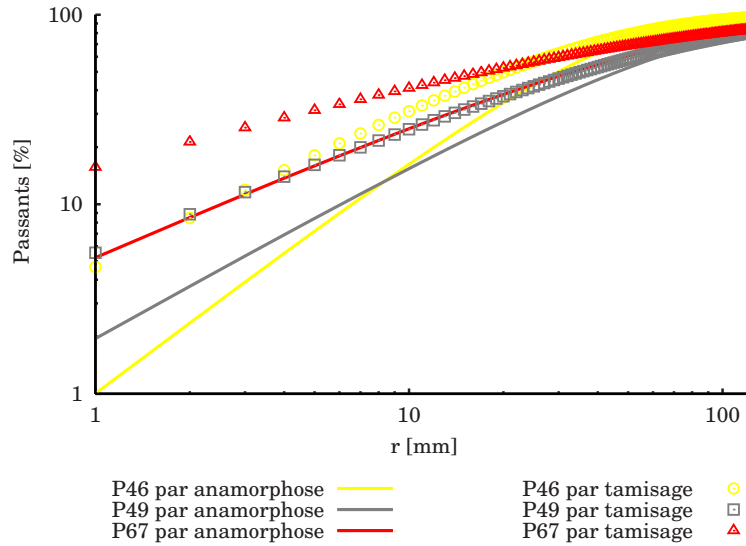


Fig. 4.18: Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs de $P10$

Commentaires

A la lumière de ce premier test expérimental, nous pouvons tirer les remarques suivantes :

- le tableau 4.2 et la figure 4.14 montrent que les fonctions d'anamorphoses diffèrent d'une image à l'autre.
- Sur les huit images comparées, seules les courbes reconstruites des trois images $P09$, $P29$ et $P14$ se rapprochent le plus de celles de référence. Néanmoins, l'examen des paramètres volumiques et surfaciques de ces quatre images ne montre aucune particularité comparées aux autres.
- Les proportions volumiques de l'ensemble des autres courbes sont surestimées par l'anamorphose donnant lieu à des courbes moins « fines » que celles de référence.
- D'autre part, la comparaison des paramètres X_{c2D} et X_{c3D} montre que l'ordre de grandeur des tailles caractéristiques est correctement extrait par analyse d'images pour pratiquement l'ensemble des images étudiées (nous commenterons ce résultat ultérieurement). Cependant, le paramètre d'uniformité n est surestimé par analyse d'images pour l'ensemble des images donnant lieu à des courbes plus « raides ».

De ce premier test, il ressort que les paramètres k et α calculés sur $P10$ ne sont pas stables pour pouvoir décrire l'ensemble des granulométries des autres images.

B - Deuxième cas : Deux tas

Dans le deuxième test de l'anamorphose pour ce premier échantillon, nous nous sommes placés dans des conditions d'applications industrielles. Pour ce faire, nous avons regroupé les neuf images en deux tas distincts : Tas $N^{\circ}1$ et Tas $N^{\circ}2$.

Le premier tas se compose des images $P32$, $P46$, $P49$ et $P67$, et le second est formé par les images $P01$, $P09$, $P10$, $P14$ et $P29$.

Le calcul des paramètres de Rosin-Rammler par ajustement des données volumiques du tas N°1, choisi comme tas de calibrage, montre qu'il représente une granulométrie étalée et contient un large éventail de tailles (Tab. 4.1 et Tab. 4.3).

Les courbes granulométriques en volumes des deux tas, mesurées par tamisage, sont présentées dans la figure 4.19.

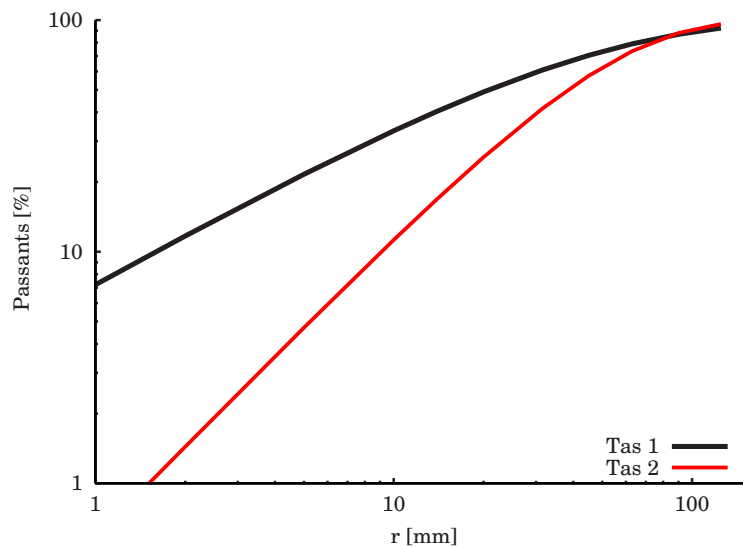


Fig. 4.19: Passants cumulés en volumes des deux tas

Traitements 2D

En premier lieu, nous avons calculé les paramètres des granulométries en surfaces (Fig. 4.20). Puis de même que pour le premier test, l'équation (4.6) permet de calculer les paramètres des anamorphoses équivalentes aux deux tas (Tab. 4.3 et Fig. 4.21).

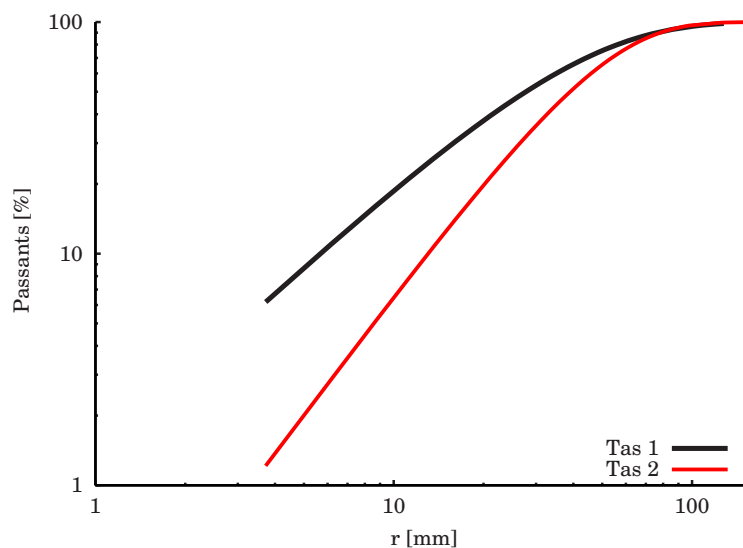


Fig. 4.20: Passants cumulés en surfaces des deux tas

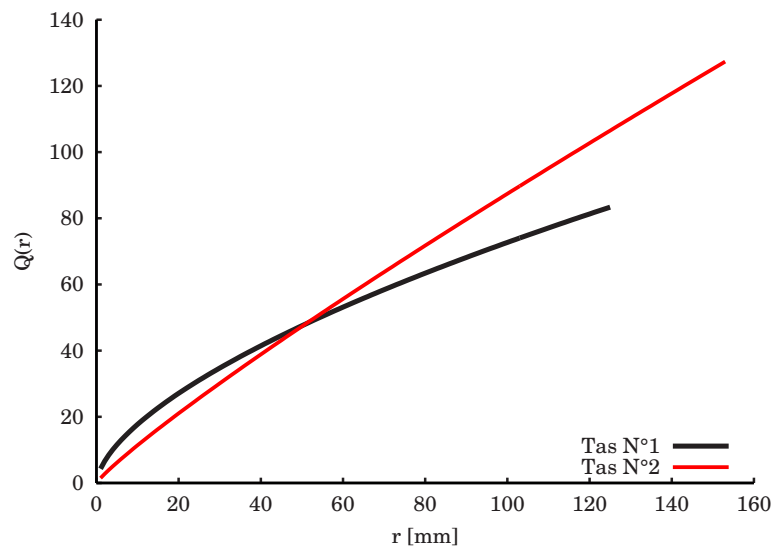


Fig. 4.21: Anamorphoses relatives aux deux tas du lot N°1

	Surfaces		Volumes		Anamorphose	
	n_{2D}	$Xc_{2D} [mm]$	n_{3D}	$Xc_{3D} [mm]$	k	α
Tas N°1	1,19	37,74	0,73	34,34	4,31	0,61
Tas N°2	1,48	47,93	1,31	50,72	1,48	0,89

TAB. 4.3: Données relatives aux deux tas du lot N°1

Tests d'anamorphose

Les calculs précédents nous ont permis de procéder aux deux test suivants :

1. Application de l'anamorphose établie sur le Tas N°1 pour le calcul de la granulométrie du Tas N°2

En premier lieu, nous utilisons l'équation 4.6 pour estimer les proportions volumiques (P_{3D}^*) du deuxième tas à partir des paramètres d'anamorphose calculés sur le Tas N°1. La figure 4.22 montre la comparaison du résultat de l'anamorphose avec la courbe de référence du tas N°2.

2. Application de l'anamorphose établie sur P10 pour le calcul de la granulométrie du Tas N°1

En second lieu, nous avons aussi tenté de remonter à la granulométrie volumique du Tas N°1 à partir des données d'anamorphose établie sur l'image P10, cette dernière n'appartenant pas au tas. La figure 4.24 montre la comparaison du résultat de l'anamorphose avec la courbe de référence du Tas N°1.

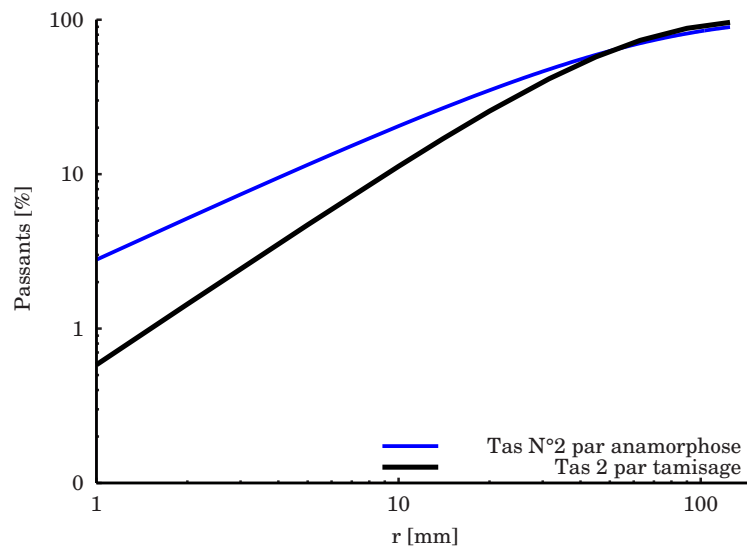


Fig. 4.22: Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs du Tas N°1

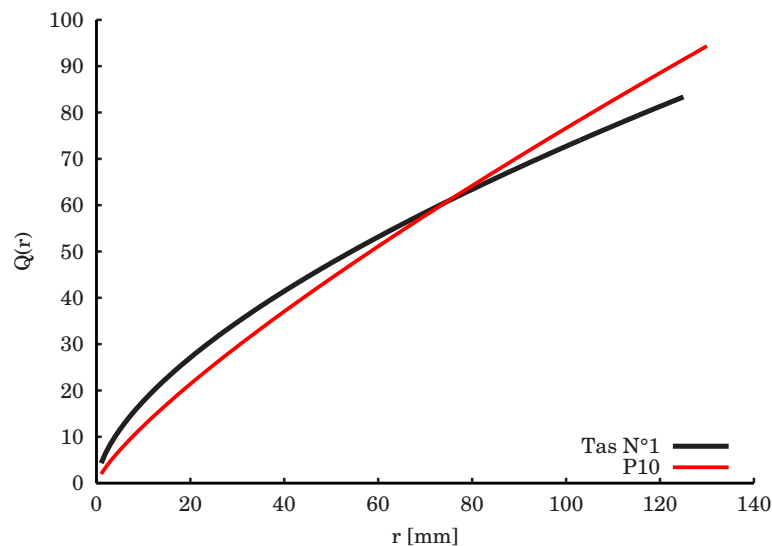


Fig. 4.23: Anamorphoses relatives aux deux tas N°1 et à l'image P10

Commentaires

Les deux tests d'anamorphose menés sur les deux tas ont montré principalement que :

- identiquement au premier test, les paramètres d'anamorphose ne sont stables ni entre les deux tas ni entre l'image P10 et le tas N°1.
- Concernant les granulométries issues de ces anamorphoses, celle du Tas N°2 est nettement plus fine que la référence, et inversement c'est la courbe de référence qui s'avère plus fine pour le Tas N°1.
- Cependant, comme pour le cas des images individuelles, l'ordre de grandeur de la taille caractéristique X_{c3D} est correctement extrait par analyse d'images pour les deux tas.

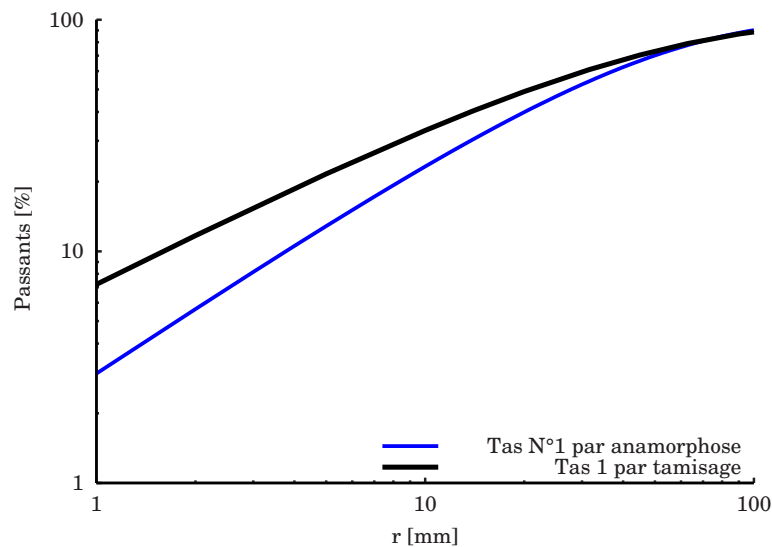


Fig. 4.24: Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs de P10

C - Troisième cas : tas unique

Le troisième test de la méthode consiste à regrouper les huit images $P01$, $P09$, $P14$, $P29$, $P32$, $P46$, $P49$ et $P67$ en un tas unique (tableau 4.4 et figure 4.25). Dans ce dernier cas, nous nous plaçons aussi dans une démarche d'application industrielle, où nous tentons de remonter à la granulométrie de référence du tas à partir d'un échantillon de taille plus petite (l'image $P10$ dans notre cas).

Traitements 2D

De même, les données des ajustements surfaciques et volumiques (Fig.4.25), et les données de l'anamorphose (Fig.4.26) qui en résultent sont regroupées dans le tableau 4.4.

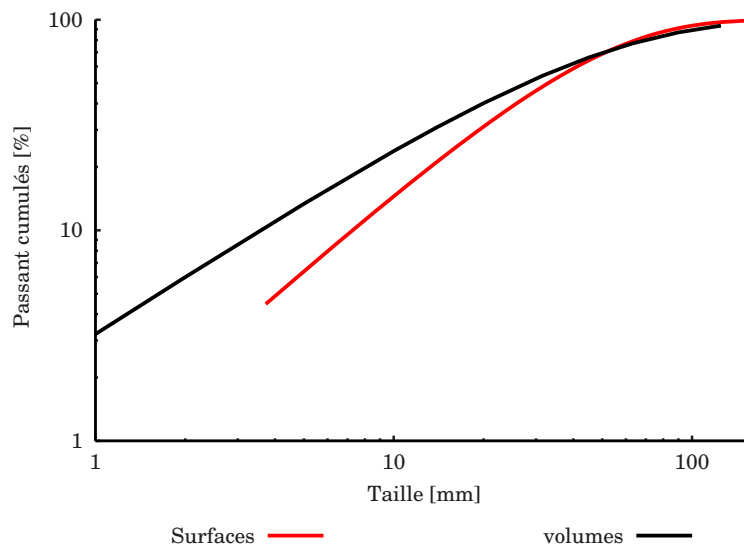


Fig. 4.25: Passants cumulés surfaciques et volumiques du tas unique (Lot N°1)

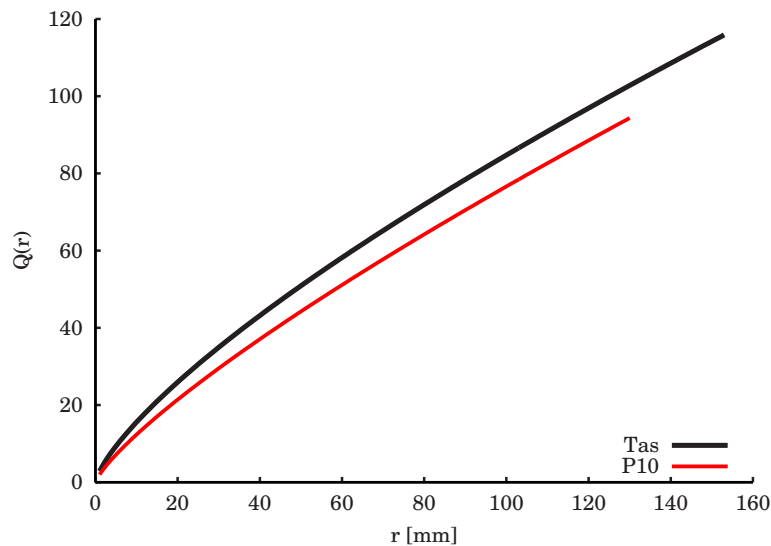


Fig. 4.26: Anamorphoses relatives au tas unique et à l'image P10

Surfaces		Volumes		Anamorphose	
n_{2D}	$Xc_{2D} [mm]$	n_{3D}	$Xc_{3D} [mm]$	k	α
1,25	44,19	0,92	41,29	2,86	0,74

TAB. 4.4: Données relatives au tas unique du lot N°1

Notons que pour ce dernier test, l'ordre de grandeur de la taille caractéristique X_c du tas est aussi correctement récupéré par traitement d'images. En proportions surfaciques, l'uniformité n est plus grande donnant des courbes plus «raides» pour le cas du traitement d'images.

Test d'anamorphose

Application de l'anamorphose établie sur l'image P10 pour le calcul de la granulométrie du tas

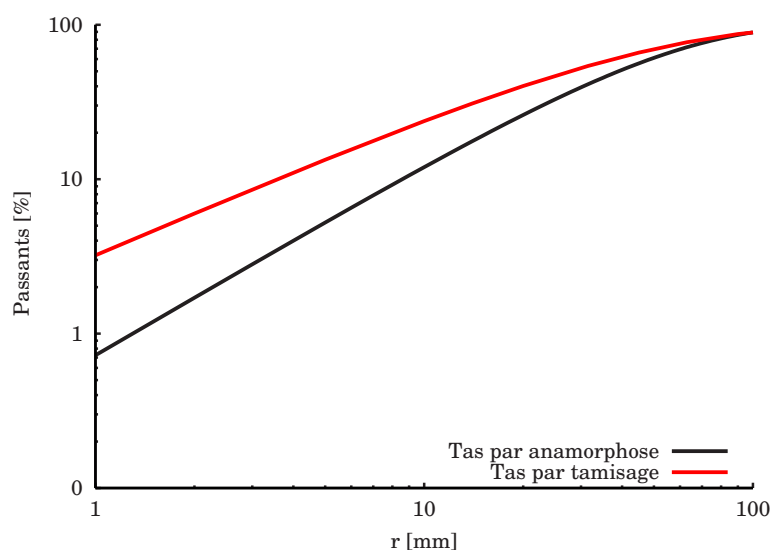


Fig. 4.27: Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs de P10

Commentaires

Les deux figures précédentes montrent aussi que :

- les courbes d'anamorphose diffèrent entre le tas et l'image P10 ;
- les proportions de la granulométrie du tas sont nettement sous-estimées par anamorphose.

4.3.4 Synthèse

Méthode d'anamorphose sur les passants cumulés

La méthode de reconstruction de la courbe granulométrique par anamorphose a été testée sur le même type de roche pour un cas ne présentant ni recouvrement ni chevauchement. L'interférence d'autres problèmes, tels que l'échantillonnage, a été ainsi évitée lors des calculs relatifs à la démarche.

Les différents tests expérimentaux effectués nous permettent d'observer les conclusions suivantes :

- d'une façon générale, l'anamorphose, calculée sur des proportions, est insuffisante pour décrire correctement les caractéristiques reliant les deux courbes granulométriques 2D et 3D. Ces dernières, lorsqu'elles sont estimées par anamorphose, suivent les mêmes tendances que les courbes établies par tamisage mais avec des proportions différentes.
- Pour les trois tests effectués, les différences remarquées entre les courbes d'anamorphose montrent qu'elles renseignent plutôt sur la relation entre l'ensemble des proportions 2D et

3D. Elles dépendent donc de la distribution de la fragmentation au sein des classes étudiées. Si bien qu'elles ne sont pas stables lorsque les proportions granulométriques varient. La comparaison des anamorphoses des deux tas illustre ces propos (figure 4.21).

- De plus, établies sur des proportions, les anamorphoses font disparaître toute notion matérielle (surfaces et volumes) qui caractérisent les granularités étudiées. Il en découle que l'anamorphose ne contient pas une information de reconstruction individuelle par surface de fragment.
- Par ailleurs, les résultats des traitements 2D étant dans l'ensemble assez corrects, les insuffisances décrites ne sont pas liées à un problème de traitement d'images proprement dit.
- Faisons une dernière remarque en ce qui concerne les aspects traités par cette fonction de transfert. En effet, en plus de l'information de reconstruction volumique contenue dans les calculs d'anamorphose, les biais dus à la différence des concepts de tailles entre les deux méthodes de tri sont aussi pris en compte sur l'ensemble des classes. La variation des tailles mises en jeu d'une image à l'autre, et donc des proportions de la granularité, semble compromettre aussi la robustesse de la méthode.

Paramètres du modèle de Rosin-Rammler

Le calcul des proportions surfaciques pour les deux types de roches différentes (échantillons N°1 et N°2 - section 4.3.5) montrent que l'ordre de grandeur de la taille caractéristique X_c est correctement extrait par traitement d'images. Néanmoins, dans l'ensemble des cas, l'uniformité n des courbes granulométriques en surfaces est supérieure à celle des courbes 3D.

Nous pouvons noter que l'apport du calcul des proportions surfaciques, pour ces types de roches, est intéressant lorsque l'uniformité n de la granularité étudiée peut être évaluée par un moyen autre que le traitement d'images, tel que le modèle de Kuz-Ram [33] qui permet d'estimer l'uniformité de la distribution à partir des paramètres du schéma de tir (Kuznetsov, 1979; Cunningham 1987, 2005) [11] [12].

4.3.5 Résultats du lot N°2

Récupération de l'ordre de grandeur de X_c

Les tests effectués sur ce deuxième échantillon, ont pour objectif de valider la conservation de l'ordre de grandeur du paramètre X_c pour un nouveau type de roches.

n_{2D}	$X_{c2D} [mm]$	n_{3D}	$X_{c3D} [mm]$
1,88	12,77	2,49	14,73

TAB. 4.5: Paramètres du modèle de Rosin-Rammler du lot N°2

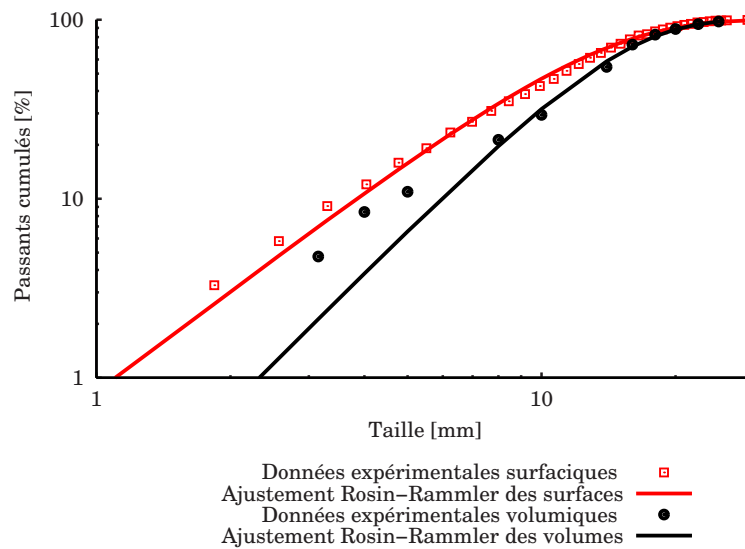


Fig. 4.28: Passants cumulés surfaciques et volumiques du lot N°2

Les données montrent que pour ce deuxième échantillon l'ordre de grandeur de la taille caractéristique est aussi correctement calculé par analyse d'images.

Si l'on se base sur l'ensemble des constatations faites sur les deux échantillons, une explication possible des légers décalages entre X_{c2D} et X_{c3D} est la différence des concepts de tailles des deux méthodes de tri.

Enfin, la récupération de ce paramètre particulier semble appuyer la notion de représentativité des images étudiées dans ce chapitre (acquisition sans information sous-jacente).

4.4 Méthode de reconstruction basée sur l'histogramme

4.4.1 Principe de la méthode et formulation mathématique

La deuxième démarche de reconstruction de la courbe granulométrique proposée concerne les histogrammes calculés par les deux méthodes de tri. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, une reconstruction basée sur les proportions n'est pas robuste.

Nous montrons dans cette section qu'il est possible de disposer d'informations plus pertinentes pour remonter à la courbe granulométrique volumique, et ce, en se basant sur la notion des **classes individuelles**. Il s'agit pour cette méthode de manipuler individuellement des notions matérielles : les surfaces et les volumes des fragments accessibles à travers les refus. Notre objectif sera d'attribuer à chaque surface de fragment la **taille** et le **volume** qui lui correspondent.

Le traitement d'images nous fournit l'ensemble des surfaces que nous aurons à manipuler. L'accès aux surfaces individuelles des fragments est possible en affinant la maille utilisée pour le tri. Cependant, il est possible que quelques classes de tailles obtenues par analyse d'images contiennent plus d'un fragment, donc plus d'une surface. La moyenne en nombre de toutes ces surfaces nous donne accès à une surface moyenne dont la taille est équivalente à celle de la classe. Cette taille étant, comme introduit dans le chapitre 1, la plus petite des deux tailles de la classe considérée.

Les volumes sont mesurés par tamisage, en passant par la masse volumique, pour les différentes classes disponibles.

Tracés dans un même repère de tailles et regroupés selon les mêmes classes, les deux histogrammes des refus surfaciques et volumiques se présentent comme illustré dans la figure 4.29.

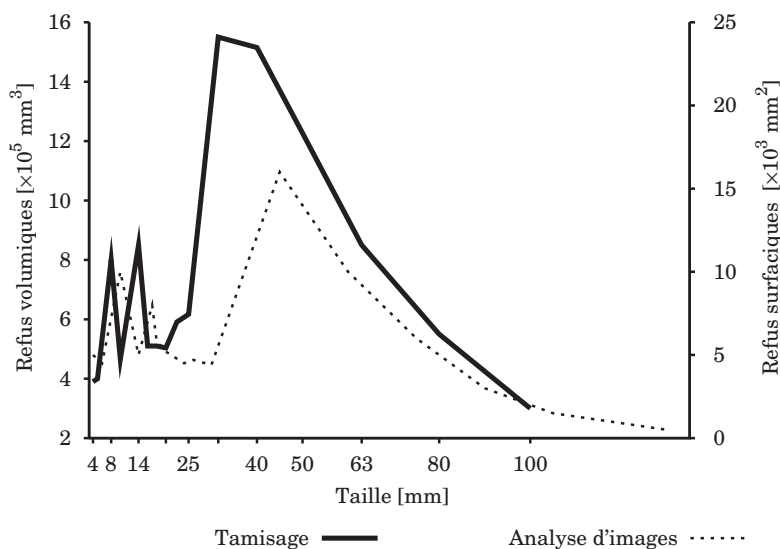


Fig. 4.29: Refus surfaciques et refus volumiques

Généralement, lorsque les refus par analyse d'images sont rangés selon des classes de tailles égales aux mailles de tamis réels, les deux histogrammes suivent la même tendance. Cependant, la différence de concept de taille entre les deux techniques s'avère un problème par rapport à

la mise en correspondance des surfaces avec leurs volumes correspondants. En effet, comme le montre la figure 4.29, les classes de refus relatifs aux deux techniques ne coïncident pas sur le même intervalle de taille (les pics notamment).

Le premier problème à résoudre sera ainsi le calcul de la loi qui relie les deux tailles mises en jeu. Ceci permettra de redistribuer les refus surfaciques selon les classes de tailles du tamisage.

Avant d'aborder la résolution de ce problème, faisons une dernière mise en garde sur le choix des classes (ou mailles des tamis) pour la mise en adéquation de la distribution et le système de mesure. Notons, pour ce fait, que pour le cas de figure illustré, l'histogramme analyse d'images est plus étalé par rapport à celui du tamisage. Cette première éventualité est rencontrée lorsque les tamis retiennent des fragments de tailles largement plus grandes que leurs mailles. Lorsque les mêmes fragments sont triés par analyse d'images, avec comme pas de tri l'unité, ils se voient attribuer des tailles plus grandes, d'où le décalage remarqué.

L'autre cas de figure possible est celui où les tailles des tamis sont choisies de telle façon à ce que les fragments retenus ne soient pas trop grands par rapport à leurs mailles. Dans ce cas, c'est l'histogramme par tamisage qui est le plus étalé. Ceci tient au fait que la taille attribuée au même fragment par tamisage est généralement plus grande que celle affectée par analyse d'images.

4.4.1.1 Problème de mise en correspondance des histogrammes : Loi des tailles

L'histogramme des refus surfaciques obtenus par traitements d'images, qu'on notera g_{2D} , peut s'écrire sous la forme :

$$g_{2D}(r_{2D}) = N_{gr} \bar{A}_{r_{2D}} f_{2D}(r_{2D}) \quad (4.7)$$

où :

- N_{gr} est le nombre total des surfaces de fragments ;
- $\bar{A}_{r_{2D}}$ est la surface moyenne de la classe de taille r_{2D} ;
- et $f_{2D}(r_{2D})$ est la loi en nombre des tailles analyse d'images.

La fonction φ qui relirait les deux tailles r_{2D} et r_{3D} s'exprimerait par la relation suivante :

$$r_{3D} = \varphi(r_{2D}) \quad (4.8)$$

Il en découle :

$$f_{2D}(r_{2D}) = f_{2D} \circ \varphi^{-1}(r_{3D}) \quad (4.9)$$

Une redistribution des refus surfaciques suivant les tailles r_{3D} , définies expérimentalement par tamisage, permet de reformuler l'histogramme g_{2D} comme suit :

$$g_{2D}(r_{3D}) = N_{gr} \bar{A}_{r_{2D}} (f_{2D} \circ \varphi^{-1})(r_{3D}) \quad (4.10)$$

$$= N_{gr} \bar{A}_{r_{2D}} h(r_{3D}) \quad (4.11)$$

Avec

$$h = f_{2D} \circ \varphi^{-1} \quad (4.12)$$

En pratique φ sera déterminée expérimentalement et doit être inversible sur l'intervalle des tailles étudié.

Le résultat de cette démarche est schématisé par la figure 4.30.

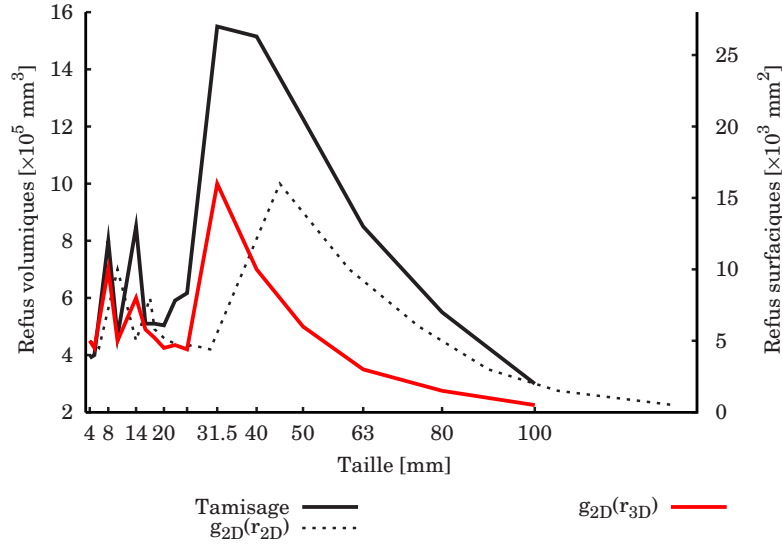


Fig. 4.30: Redistribuition des classes analyse d'images

La redistribution, équivalente à un changement de repère, permet ainsi d'affecter expérimentalement à chaque surface moyenne $\bar{A}_{r_{2D}}$ la taille r_{3D} qui lui correspond (**loi des tailles**).

4.4.1.2 Reconstruction des volumes : Loi des épaisseurs

Après avoir mis en correspondance les deux histogrammes, nous pouvons calculer la troisième dimension, notée épaisseur, qui relie les différentes surfaces moyennes aux volumes moyens équivalents.

La loi des épaisseurs est formulée comme suit :

$$e(r_{3D}) = \frac{g_{3D}(r_{3D})}{g_{2D}(r_{3D})} \quad (4.13)$$

ou bien, en prenant en compte le nombre de fragments de chaque classe :

$$e(r_{3D}) = \frac{\bar{V}_{r_{3D}}}{\bar{A}_{r_{2D}}} \quad (4.14)$$

où :

- $g_{3D}(r_{3D})$ l'histogramme des refus volumiques calculé par tamisage ;
- et $\bar{V}_{r_{3D}}$ le volume moyen de la classe de taille r_{3D} .

Comme pour $\bar{A}_{r_{2D}}$, $\bar{V}_{r_{3D}}$ est calculé en passant par le **nombre des grains** de chaque classe.

Chaque surface moyenne $\bar{A}_{r_{2D}}$ est ainsi reliée expérimentalement à une épaisseur $e_{r_{3D}}$ (**loi des épaisseurs**).

La figure 4.31 illustre cette étape de calcul.

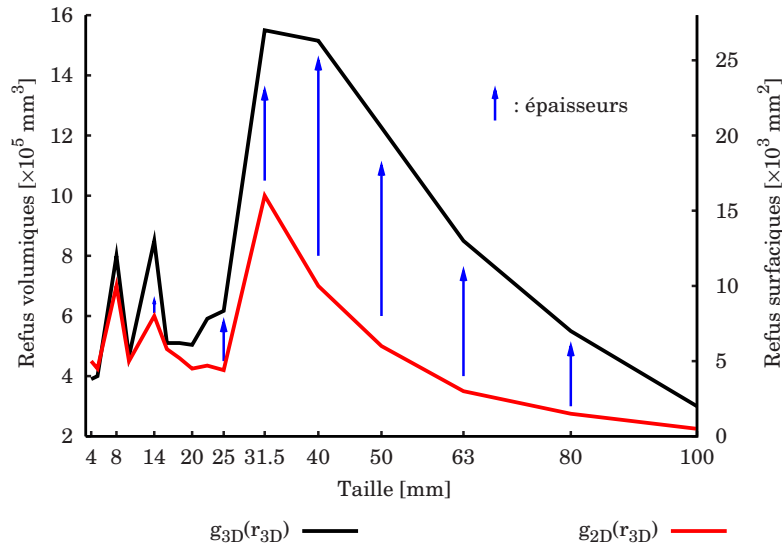


Fig. 4.31: Calcul des épaisseurs

4.4.2 Considérations expérimentales

Les deux lois décrites s'appuient sur une démarche expérimentale. En effet, notre objectif étant de mesurer des volumes et des tailles, nous avons évité la démarche qui consiste à reconstruire, en premier lieu, les fragments en leur attribuant un volume théorique.

Notre choix est justifié par le fait que le tamisage étant la référence de la mesure, toutes les validations finales sont faites sur la base des résultats de ce dernier. Dans nos calculs de reconstruction, nous nous basons d'emblée sur les mesures du tamisage pour calculer les deux lois de reconstruction, ce qui nous affranchit d'une modélisation volumique, proprement dite, basée sur l'affectation d'une forme particulière aux fragments (sphères, cubes, etc...). Cela se justifie aussi par le fait que l'intérêt final de la reconstruction est le calcul des proportions volumiques et non la connaissance des différentes formes des fragments.

Expérimentalement, nous pouvons procéder comme suit :

1. L'acquisition et le tamisage **individuels** des différentes classes de tailles i de la distribution étudiée permet d'obtenir respectivement les deux tailles r_{i2D} et r_{i3D} ainsi que la surface et le volume qui se correspondent.
2. Une fois les deux tailles ajustées, les surfaces sont redistribuées via la loi des tailles. Ensuite les volumes sont calculés, par analyse d'images, en utilisant la loi des épaisseurs.

Problème d'affectation des tailles 2D expérimentales

Un dernier problème à résoudre, qui est indépendant de l'établissement des deux lois, est celui de l'affectation des tailles 2D expérimentales à chaque classe individuelle.

Pour ce qui concerne le traitement d'images des classes **individuelles** expérimentales 2D, la taille r_{i2D} affectée à chaque classe correspondra à la moyenne des tailles 2D calculées lors du tri.

En effet, nous savons que pour le tamisage, la taille r_{i3D} de la classe individuelle correspond à la maille du plus petit des deux tamis de la classe. Alors que par analyse d'images des ouvertures par reconstruction sont progressivement opérées sur l'image binaire représentant la classe individuelle jusqu'à ce que le dernier fragment soit trié. Ce qui donne différentes tailles $2D$ pour la même classe. S'agissant d'une classe individuelle de fragments, la taille affectée aux surfaces est prise comme la moyenne des tailles des ouvertures opérées sur la classe (figure 4.32).

Pour ce qui concerne le refus équivalent à cette taille, c'est naturellement la somme de toutes les surfaces de la classe.

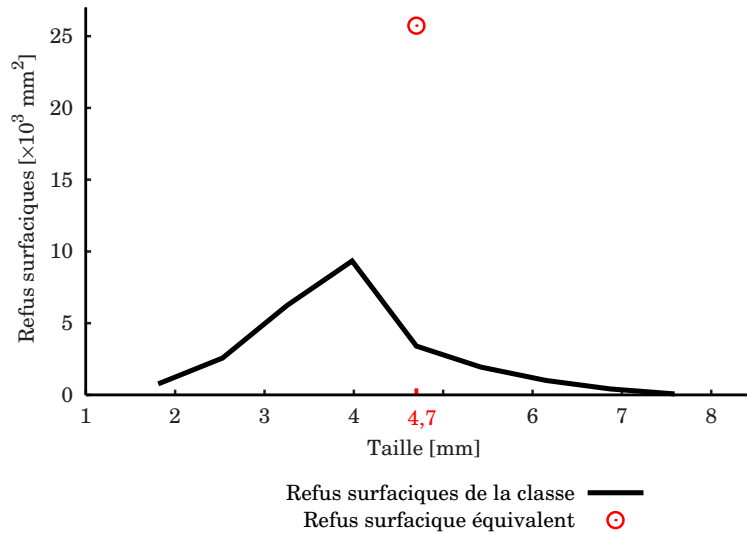


Fig. 4.32: Distribution des surfaces en fonction des tailles à l'intérieur d'une classe donnée

4.4.3 Validations expérimentales de la méthode des histogrammes

Après avoir présenté le principe de la méthode, nous allons dans cette section valider la modélisation mathématique par un cas expérimental. Le premier lot considéré, N°3, constitué de classes individuelles (section 4.1.3), sera utilisé pour le calcul des deux lois de reconstruction.

Ensuite les deux lois établies seront utilisées avec les résultats d'analyse d'images du lot N°4 pour remonter à sa courbe granulométrique de référence.

L'intégralité des données des traitements $2D$ et des images équivalentes sont présentées dans la section (2) des annexes.

4.4.3.1 Calcul des deux lois de reconstruction à partir du lot N°3

A - Loi des tailles

En premier lieu, le calcul par traitement d'images des refus surfaciques du lot N°3 fournit pour chaque classe individuelle de tamisage un histogramme des surfaces. Puis le calcul de la taille et le refus équivalents à chacune de ces classes, comme nous l'avons explicité dans la section précédente, permet d'obtenir l'histogramme $g_{2D}(r_{2D})$ de l'ensemble des classes. Ce dernier est présenté dans le même repère que celui des volumes $g_{3D}(r_{3D})$ (tamisage) dans la figure 4.33.

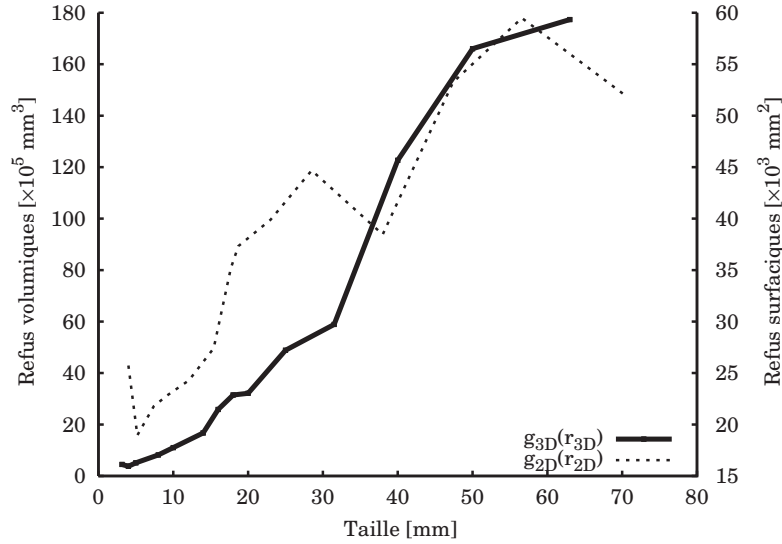


Fig. 4.33: Refus surfaciques et volumiques des différentes classes individuelles du lot N°3

De même que pour l'histogramme $g_{3D}(r_{3D})$, chaque point de l'histogramme $g_{2D}(r_{2D})$ correspond ainsi à une seule classe (une image pour cet exemple).

Comme le montre la figure précédente, nous pouvons constater qu'effectivement les classes équivalentes aux deux techniques de mesure ne se correspondent pas. Cependant, expérimentalement, les classes individuelles i de tamisage équivalentes aux différentes images étant connues, nous pouvons faire correspondre directement chaque taille $r_{i_{3D}}$ à sa taille $r_{i_{2D}}$ équivalente (figure 4.34).

La fonction φ est ensuite établie par ajustement des données expérimentales $r_{i_{2D}}$ et $r_{i_{3D}}$ (Eq.4.15).

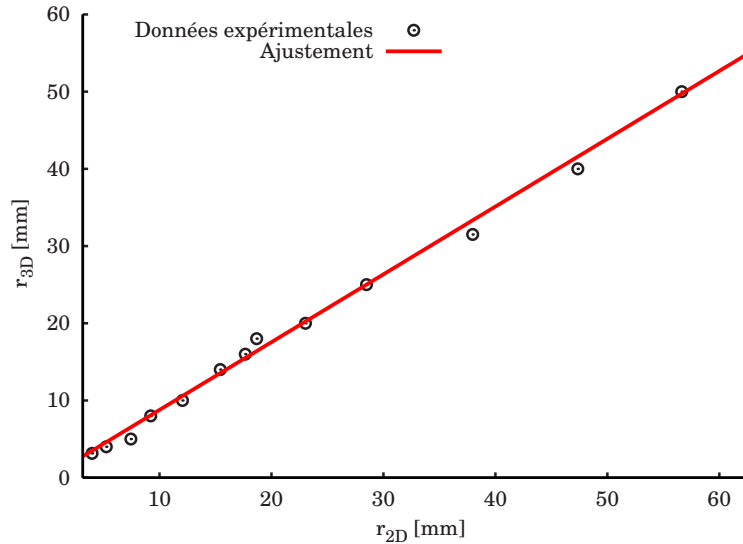


Fig. 4.34: Fonction φ (lot N°3)

$$r_{3D} = 0,878 r_{2D} \quad (4.15)$$

$$= \varphi(r_{2D}) \quad (4.16)$$

Le calcul de la fonction φ permet de redistribuer les différents refus surfaciques selon les tailles r_{i3D} . Le nouvel histogramme des surfaces $g_{2D}(r_{3D})$ est présenté dans la figure 4.35.

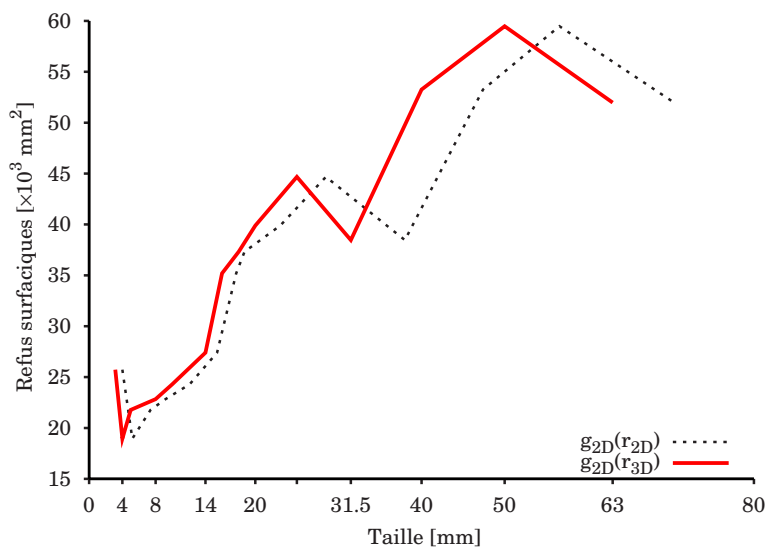


Fig. 4.35: Redistribution des classes analyse d'images (lot N°3)

Puis, comme explicité dans la section 4.4.1, le comptage des surfaces de chaque classe fournit pour chaque taille r_{i3D} , la surface moyenne \bar{A}_{i2D} associée (figure 4.36).

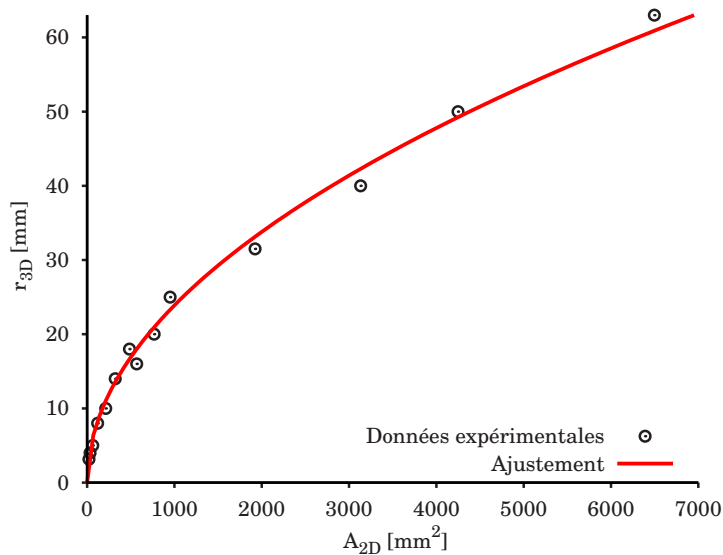


Fig. 4.36: Loi des tailles du lot N°3

Enfin la **loi des tailles** est calculée par ajustement des données expérimentales (Eq. 4.17).

$$r_{3D} = 0,63 \bar{A}_{2D}^{0,5237} \quad (4.17)$$

$$\approx 0,7556 \bar{A}_{2D}^{0,5} \quad (4.18)$$

B - Loi des épaisseurs

Pour le calcul de la loi des épaisseurs, nous allons nous baser sur les deux histogrammes $g_{2D}(r_{3D})$ et $g_{3D}(r_{3D})$ présentés dans la figure 4.37.

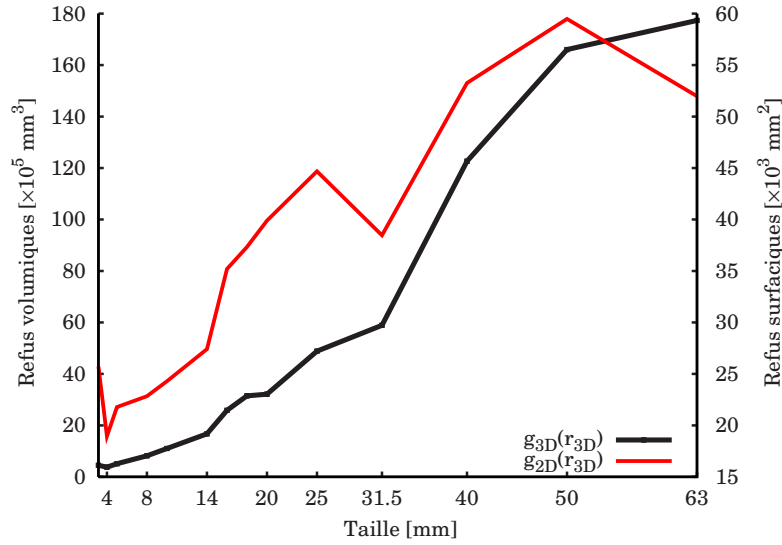


Fig. 4.37: Refus surfaciques ajustés et refus volumiques du lot N°3

A ce niveau, nous devons relier chaque surface à son volume équivalent. De même que pour les surface moyennes $\bar{A}_{i_{2D}}$, les volumes moyens $\bar{V}_{i_{3D}}$ (tamisage) sont calculés en se basant sur le nombre des grains de chaque classe précédemment calculé.

Puis, l'ajustement des surfaces moyennes $\bar{A}_{i_{2D}}$ aux épaisseurs $e_{i_{3D}}$, calculées via l'équation 4.14, permet d'établir, par ajustement, la loi des épaisseurs (Eq. 4.19).

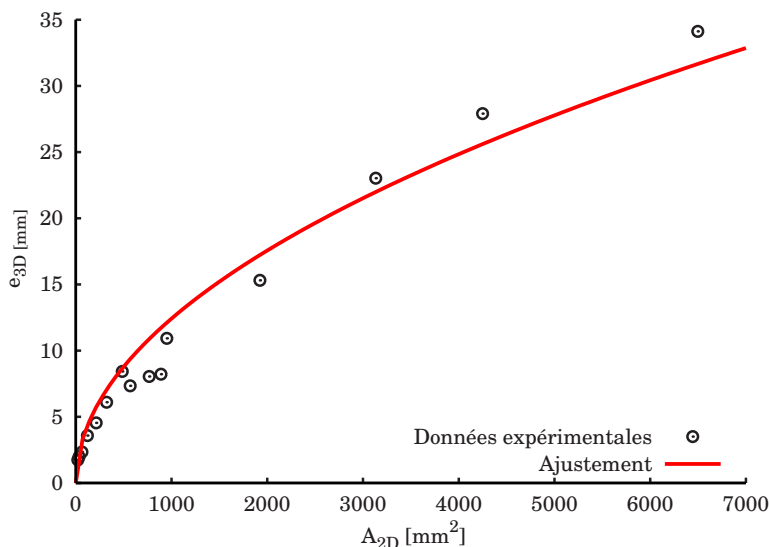


Fig. 4.38: Loi des épaisseurs du lot N°3

$$e_{r_{3D}} = 0,282 \bar{A}_{2D}^{0,5326} \quad (4.19)$$

$$\approx 0,393 \bar{A}_{2D}^{0,5} \quad (4.20)$$

Commentaires

L'analyse des deux courbes (4.36) et (4.38), représentant les deux lois de reconstruction, nous permet de faire les remarques suivantes :

- pour les deux lois établies, les tailles aussi bien que les épaisseurs sont proportionnelles à la racine carrée de la surface moyenne. Il en ressort que la démarche étant expérimentale, le caractère d'homogénéité entre les dimensions manipulées est bien respecté.
- D'autre part, les ajustements montrent que les deux lois peuvent s'extrapoler correctement au niveau des grandes tailles. Ceci nous permet en théorie d'envisager leur application pour des distributions ayant des tailles maximales plus grandes que celle du lot N°3.

4.4.3.2 Reconstruction de la granulométrie de l'échantillon N°4

Nous allons appliquer les deux lois de reconstruction établies sur le lot N°3 (Eq. 4.17 et Eq. 4.19). Pour valider la démarche, la courbe granulométrique volumique du lot N°4, issue de l'analyse d'images et de la modélisation, sera comparée à la courbe de référence. Avant d'aborder les calculs de reconstruction, rappelons deux choses essentielles :

- le type de roche étudiée est le même pour les deux lots ;
- les fragments du lot N°4 sont mélangés avant acquisition, donnant lieu à neuf images, chacune représentant différentes classes de l'ensemble de la distribution.

La séquence de calcul est la suivante :

1. En premier lieu, le traitement des neuf images du lot fournit les refus surfaciques de l'ensemble de la distribution (figure 4.39).

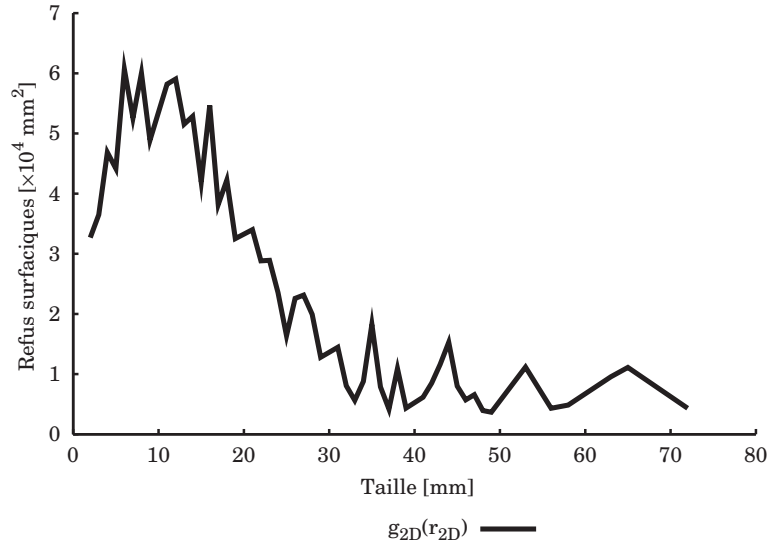


Fig. 4.39: Refus surfaciques calculés par analyse d'images du lot N°4

2. Pour chaque classe de tailles analyse d'images, le comptage des grains permet de déterminer les surfaces moyennes \bar{A}_{2D} . Ensuite la loi des tailles (Eq. 4.17) permet d'affecter à chaque surface moyenne sa taille r_{3D} .
3. De même, la loi des épaisseurs (Eq. 4.19) permet de calculer les épaisseurs $e_{r_{3D}}$ relatives à ces surfaces moyennes.
4. Les volumes issus de l'analyse d'image sont ensuite calculés moyennant l'équation (4.13), puis affectés aux nouvelles classes r_{3D} .

La figure (4.40) présente l'histogramme initial des surfaces et celui des volumes qui résultent de l'application des deux lois de reconstruction. Elle ne concerne que les données du traitement d'images.

Notons à ce niveau que les volumes calculés par analyse d'images sont déjà distribués suivant les tailles r_{3D} . Toutefois, si l'on considère les classes tamisage usuelles, tout se passe comme s'ils étaient triés plus finement suivant des tamis plus nombreux.

5. Aussi, pour pouvoir comparer les refus issus des deux techniques, nous allons regrouper les refus volumiques estimés par analyse d'images suivant les classes du tamisage. Cette opération s'effectue en sommant les refus des classes établies par analyse d'images intermédiaires aux classes du tamisage (Fig. 4.41).

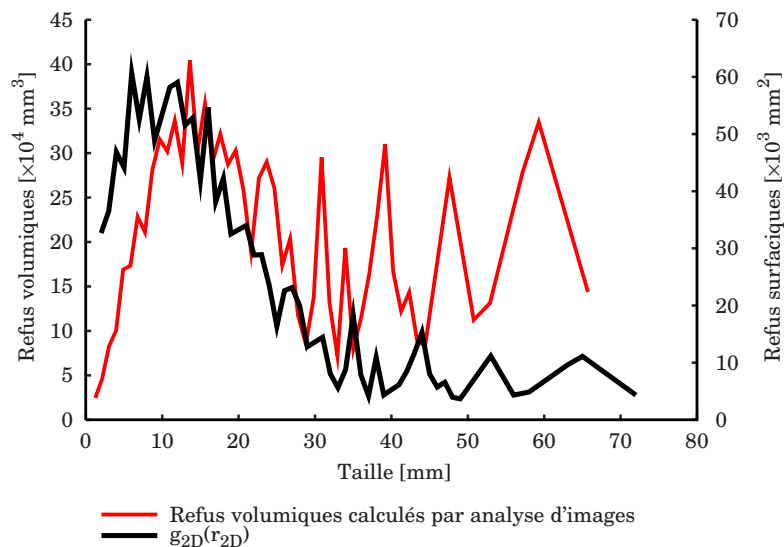


Fig. 4.40: Refus surfaciques et volumiques calculés par analyse d'images (lot N°4)

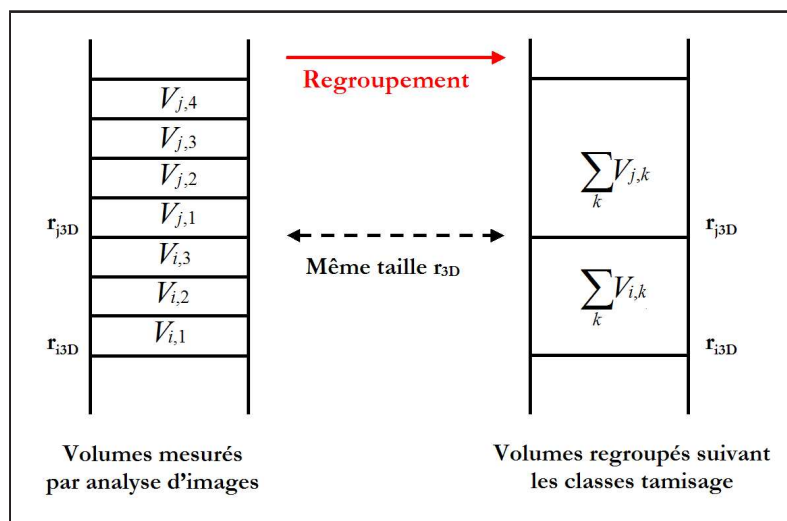


Fig. 4.41: Schéma de regroupement des refus volumiques

Le nouvel histogramme des volumes calculés par analyse d'images est présenté dans la figure 4.42.

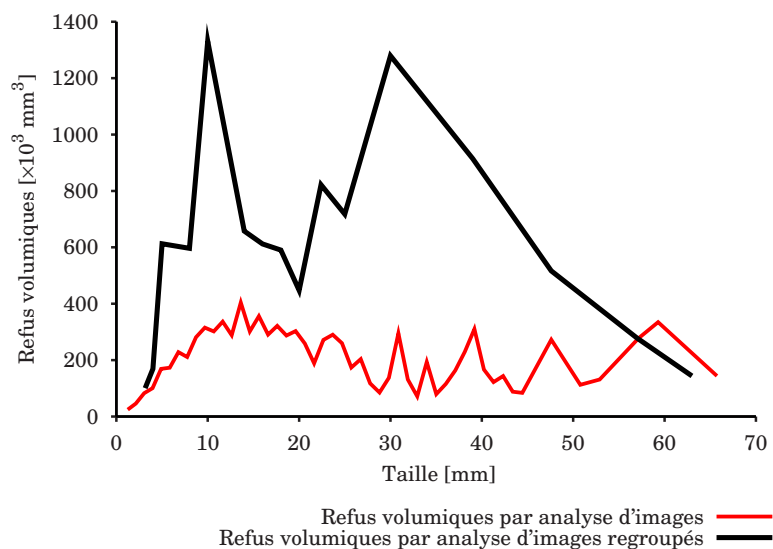


Fig. 4.42: Regroupement des refus volumiques calculés par analyse d'images suivant les classes de tailles tamisage (lot N°4)

6. Enfin, l'histogramme des refus volumiques calculés par analyse d'images est comparé à celui de référence (Fig. 4.43).

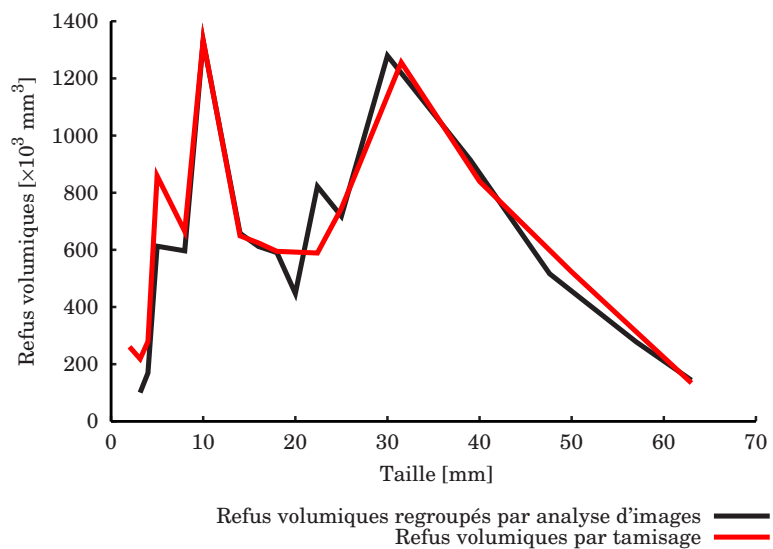


Fig. 4.43: Refus volumiques relatifs aux deux techniques de mesure (lot N°4)

Commentaires

Cette dernière figure montre que les deux histogrammes suivent les mêmes tendances sur l'ensemble de l'intervalle des tailles. De plus, le volume total est pratiquement identique pour les deux techniques de mesure.

Nous pouvons remarquer deux types de décalages. Les premiers concernent les différences de volumes pour les classes de petites tailles. Les seconds sont remarqués au niveau des grandes tailles, où les volumes sont égaux mais attribués à des tailles légèrement différentes. Ces remarques peuvent s'expliquer par les deux points suivants :

- les quelques sur-segmentations et fusions des petites particules altèrent la distribution des surfaces au sein des classes de petites tailles. Ce qui donne lieu à des volumes différents de ceux de la référence pour ces classes. Cependant, les surfaces mises en jeu étant petites (donc les épaisseurs aussi) cela ne se répercute pas grandement sur le volume total de la distribution.
- Pour ce qui concerne les décalages entre les classes de grandes tailles, ils sont dus au fait que les tailles et les épaisseurs des gros fragments calculées par ajustement diffèrent légèrement de ceux de la référence. La quantité des fragments, utilisés lors des calculs des deux lois pour ces classes, n'est ainsi pas assez représentative des classes en question. Une amélioration sera éventuellement possible si l'on augmente le nombre de fragments pour ces classes lors de l'établissement des deux lois de reconstruction.

Les proportions volumiques cumulées équivalentes aux deux techniques de mesure, ainsi que les paramètres des ajustements aux Rosin-Rammler sont présentés dans les figures (4.44) et (4.45).

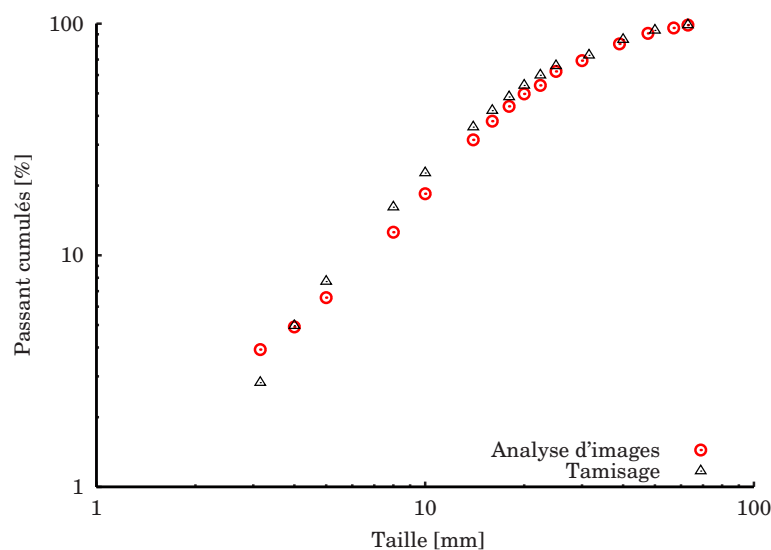


Fig. 4.44: Proportions volumiques expérimentales relatives aux deux techniques de mesure (lot N°4)

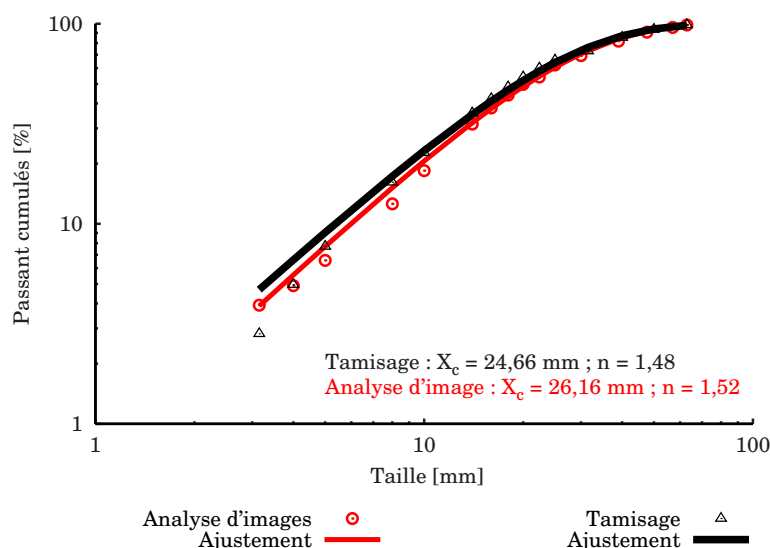


Fig. 4.45: Paramètres d'ajustement des proportions volumiques du lot N°4

La figure (4.44) montre que les proportions expérimentales établies par les deux techniques de mesure sont très proches sur l'ensemble des classes. Si bien que les ajustements donnent des courbes granulométriques **pratiquement confondues** (Fig. 4.45), résultat auquel nous nous attendions puisque les histogrammes des refus sont presque égaux. Il en découle aussi que l'ordre de grandeur du paramètre d'**uniformité** n est **correctement calculé** par analyse d'images.

4.4.4 Synthèse

Les calculs effectués sur les deux lots nous ont permis de valider cette nouvelle approche de reconstruction pour ce type de roche. Les résultats obtenus par cette méthode sont nettement meilleurs que ceux de l'anamorphose établie sur les passants cumulés. Les apports de la méthode résident dans les points suivants :

- basées sur une information intrinsèque aux surfaces individuelles des fragments, les deux lois de reconstruction s'avèrent robustes. En effet, la stabilité de ces dernières est indépendante du changement des proportions des classes étudiées (lots N°3 et N°4).
- L'étalement de la courbe granulométrique n'est plus surestimé par l'analyse d'images et les proportions volumiques sont pratiquement égales à celles de référence.
- L'établissement des lois sur la base directe des refus du tamisage a permis d'éviter les biais relatifs à l'attribution de volumes théoriques aux surfaces extraites (ellipsoïdes, sphères, etc...).
- D'autre part, hormis le calcul des proportions cumulées (objectif principal de la mesure), la nouvelle démarche permet un accès aux refus matériels ; notamment les masses des classes (moyennant la connaissance de la masse volumique). Ceci constitue une information supplémentaire pour les applications industrielles puisqu'elle fournit un indicateur par traitement d'images de la masse acquise. Chose qui n'était pas offerte par les démarches antérieures.

- De plus, le fait que la reconstruction menée sur des images sans recouvrement et sans chevauchement fournit la même granulométrie que celle de référence, nous permet de séparer les éventuels problèmes liés à l'échantillonnage des aspects traitements d'images.
- L'accessibilité aux masses correctes des différentes classes permet aussi à la démarche d'être insérée correctement dans une théorie d'échantillonnage des matières morcelées (P.GY, 1967, 1971) [20] [21] [19] pour remonter à l'éventuelle granulométrie de l'ensemble du tas abattu au tir à l'explosif.
- Notons aussi, que pour cette méthode nous n'avons pas d'obligation d'ajustement des données expérimentales à des modèles mathématiques (type Rosin-Rammler) puisque le raisonnement est conduit sur les refus.
- Enfin, comme nous l'avons signalé auparavant, pour ce type de roche, les deux lois de reconstruction s'extrapolent au niveau des grandes tailles.

S'il s'avère que cette propriété reste valable pour d'autres types de roches fragmentées différemment (avec éventuellement un débit naturel différent), l'établissement des deux lois sur un échantillon réduit nous permet d'envisager leur application à des distributions plus étalées. Ceci nous affranchit de devoir manipuler les fragments de très grandes tailles.

Par ailleurs, les deux lois de reconstruction étant établies expérimentalement par ajustements des surfaces moyennes, le nombre de grains par classes, du lot de référence (une quinzaine de fragments par classe du lot N°3 pour notre cas), devra être augmenté pour garantir une surface moyenne assez représentative. Les décalages relevés aux niveaux des grandes tailles pourront ainsi être réduits.

Il est également essentiel de noter que cette démarche de reconstruction par la méthode des histogrammes a été permise grâce à l'extraction correcte de l'information surfacique (image binaire des surfaces entières ou des boules maximales). Évidemment, la démarche s'avérerait inenvisageable pour le cas d'images binaires représentant des contours partiels ou une forte sur-segmentation et fusion de fragments.

Cas pratiques

Explicitons, pour conclure cette synthèse, la démarche à suivre et l'intérêt de la méthode des histogrammes, pour une application industrielle :

- rappelons tout d'abord qu'en pratique, le calibrage des outils de mesure par analyse d'images, s'effectue en reliant les données mesurées par criblage d'un échantillon représentatif de la distribution aux données calculées par analyse d'images acquises sur le même échantillon regroupé.
- Notre démarche s'avère simple dans sa mise en oeuvre et interfère peu avec ces opérations. En effet, le plus expérimental qui la caractérise, consiste à :
 - éviter le mélange des fragments de l'échantillon après criblage ;
 - prendre ensuite des images individuelles d'un nombre suffisant de fragments de chaque classe mesurée par criblage, tout en veillant à les séparer et à les disposer sur une seule couche avant acquisition. Puis, le pesage de chaque classe individuelle acquise nous permet de nous placer dans les mêmes conditions que les essais précédemment décrits.

- L'intérêt pratique se manifeste par l'établissement des deux lois de reconstruction volumique pour un site donné. D'un côté, tant que les conditions de fragmentation et le type de roche du site étudié ne changent pas, les deux lois restent stables. D'un autre côté, la disponibilité de ces deux lois permettra d'appréhender correctement les corrections des biais inévitables dus à la présence d'un faible recouvrement et chevauchement pour le cas de la bande. Les deux lois seront aussi utiles après résolution des erreurs conséquentes de recouvrement et de chevauchement pour le cas d'une acquisition sur camion (objet de l'étude menée dans le chapitre suivant).

Enfin, les deux lois permettront aussi d'envisager l'application de la démarche dans un cadre de contrôle de qualité à tous les stades de la production jusqu'aux produits finis, notamment les autres opérations inscrites dans le criblage : les **enrochements** et la **blométrique**.

Étude du problème de masquage entre fragments

*E*n analyse d'images des roches fragmentées, nous parlons de **masquage** lorsque les images étudiées représentent des fragments qui se recouvrent et se chevauchent mutuellement. Une partie de la distribution des tailles est ainsi complètement inaccessible à l'acquisition. Il s'ensuit que la surface de la couche étudiée (représentée par l'image) est nécessairement **non-représentative** de l'ensemble de la distribution des tailles des fragments. Par conséquent, une reconstruction volumique directe, conduite sur les parties visibles des fragments détectés en surface, s'accompagnera forcément de biais.

Dans ce dernier chapitre, nous nous proposons d'étudier ce problème de masquage, rencontré principalement au niveau des images acquises sur les engins de transport. La technique de reconstruction stéréologique que nous allons étudier est basée sur les modèles de structures aléatoires, plus particulièrement celui des **feuilles mortes** (Jeulin, 1991) [26] [29]. En effet, par son processus de construction, c'est le modèle aléatoire qui simule le mieux l'implantation des roches fragmentées lors du chargement. Les surfaces acquises sont considérées comme une réalisation aléatoire du processus de chute des fragments lors du chargement.

L'objectif de l'utilisation du modèle est de pouvoir estimer les **caractéristiques correctes des surfaces** des fragments subissant le recouvrement et le chevauchement. L'idée est de pouvoir appliquer par la suite la modélisation volumique décrite dans le chapitre précédent pour estimer la distribution en volumes des surfaces correctes. Dans un cadre plus large, ceci contribuera à une meilleure estimation du contenu granulométrique de l'engin de transport. Cette dernière information pourra être incluse dans une démarche statistique qui considère le contenu de l'engin comme un échantillon (ou partie d'un échantillon) pour remonter à la distribution des tailles de l'ensemble du tas fragmenté.

Dans ce qui suit, nous allons commencer par décrire le modèle aléatoire des feuilles mortes (section 5.1). Puis les hypothèses nécessaires à son application pour le cas des roches fragmentées sont expliquées. Ensuite les limites de l'application de l'hypothèse du schéma Booléen, premier test du modèle, sont commentées. Dans la perspective d'une application correcte du modèle, à travers la méthode dite de **statistique des fragments intacts**, une nouvelle technique expérimentale d'acquisition a été élaborée. La description de cette technique ainsi que de ses apports concluent ce chapitre.

5.1 Modèles de structures aléatoires

5.1.1 Descriptions générales

Les modèles de structures aléatoires sont des modèles probabilistes dérivés de la théorie des ensembles aléatoires initiée par G. Matheron [44] [26]. L'intérêt principal de leur introduction est de pouvoir étudier des structures de matière très complexes et très hétérogènes à travers deux aspects :

- un aspect dit *descriptif* qui consiste à décrire la formation des structures à travers l'étude de :
 - la texture et la rugosité des matériaux ;
 - le dépôt de poudres ;
 - l'agencement de cristaux ;
 - etc...
- et un aspect dit *prédictif* qui utilise les paramètres intrinsèques pour prédire les caractéristiques non accessibles directement, telles que : la forme, le volume, la surface, la percolation, etc...

L'intérêt pour nous d'utiliser ces modèles est justement ce deuxième aspect. En effet, les paramètres qui servent à la création de ces modèles peuvent être inférés pour un cas réel à partir d'une réalisation aléatoire de la structure modélisée.

Notre objectif est d'inférer l'information des surfaces inaccessibles de la distribution des tailles à cause du recouvrement et du chevauchement. Pour ce faire, comme évoqué auparavant, nous allons tester la validité du modèle de structures aléatoires qui simule le mieux la mise en place des fragments lors du chargement, à savoir celui des **feuilles mortes**.

Nous devons ainsi vérifier que le modèle est apte à décrire fidèlement la génétique de notre structure, la chute des fragments dans les bennes des engins de transport notamment. Si tel est le cas, cela nous permettra de mesurer les caractéristiques des surfaces des fragments à partir d'une réalisation du modèle (l'image binaire des fragments segmentés).

5.1.2 Modèle de feuilles mortes

Comme de nombreux autres modèles aléatoires, le modèle de feuilles mortes se base sur l'implantation de grains A' dits primaires sur les points d'un **processus ponctuel de Poisson** d'intensité $\theta(t)t$, ce dernier étant lui-même un ensemble aléatoire [26] [29]. Les grains primaires seront les composants de la structure à modéliser (les surfaces des fragments pour notre cas) et leur forme dépendra de cette dernière.

L'implantation des différents grains s'effectue de façon chronologique pendant un laps de temps donné.

Plus précisément, la séquence de construction du modèle est la suivante :

- pendant un intervalle de temps $[t, t + dt]$, en chaque point x d'un processus infinitésimal de Poisson d'intensité $\theta(t) dt$ est implanté un grain primaire A'_x , correspondant à une réalisation aléatoire indépendante du grain primaire A' . Durant l'implantation, le **chevauchement** entre grains est permis. L'union des grains obtenus est aussi un ensemble

aléatoire appelé **schéma Booleén infinitésimal** de même intensité [26] [29]. Il représente la couche des grains implantés pendant le temps dt .

- L'opération est répétée pour chaque intervalle de temps jusqu'à écoulement du temps global fixé pour l'implantation. Les grains qui apparaissent pendant l'intervalle de temps dt **couvrent** ainsi les anciens grains apparus dans un temps $u < t$.

Ainsi, le modèle simule le **chevauchement et le recouvrement** des grains au fur et à mesure de la construction. La puissance du modèle est qu'il est possible, en se basant sur une seule réalisation, de remonter à l'information sous-jacente des couches inaccessibles à l'acquisition à partir de celle de la couche supérieure (hypothèse dite d'*ergodicité*), et ce, dans le cas où la construction ne dépend pas de t .

5.1.3 Hypothèses de résolution pour le cas des roches fragmentées

Ségrégation et groupement

Il faut noter une différence importante entre la génétique du modèle et la formation de notre structure de roches (chargement du camion par exemple). En effet, comme le remarque R. Chavez (1996) [8], la ségrégation et le groupement que subissent les fragments lors du chargement ne rentrent pas dans le processus de construction du modèle.

Il en ressort que pour pouvoir appliquer le modèle de feuilles mortes à notre cas de roches fragmentées, il faut émettre quelques hypothèses simplificatrices. Ainsi, la première hypothèse consiste à supposer que le remplissage des bennes des engins de transport s'effectue couche par couche. En second lieu, les fragments, généralement de petites tailles, subissant la ségrégation et le groupement entre fragments de grandes tailles ne seront pas pris en compte, en ce qui concerne la modélisation par feuilles mortes retenue ici.

La proportion de ces fragments, représentés par les zones noires dans les images binaires (Fig. 5.1), devra être calculée à travers un modèle de ségrégation. Ce dernier constituera les calibrages finaux basés sur une comparaison des résultats du tamisage de la distribution et de la modélisation stéréologique entière (reconstruction de la courbe volumique et masquage).

Par ailleurs, l'hypothèse d'indépendance par rapport à t implique nécessairement que les zones noires présentes à l'image renseignent sur les zones noires des autres couches.

Comme évoqué auparavant (section 1.4), avec cette démarche, nous nous assurons que les calibrages tiendront compte exclusivement des problèmes dus à la ségrégation et au groupement. D'où la perspective d'une modélisation correcte de ces deux phénomènes.

Définition du grain primaire

D'autre part, il faut noter que la segmentation complète des fragments (rendue possible grâce aux développements décrits dans la partie 2) nous affranchit du problème de la définition du grain (fragment) primaire rencontré pour le cas d'une segmentation partielle de l'image. Il n'y aura pas lieu de définir un grain primaire type, mais l'image segmentée sera en effet considérée comme une réalisation aléatoire du modèle, où chaque surface de fragment est une réalisation aléatoire indépendante d'un grain primaire hypothétique.

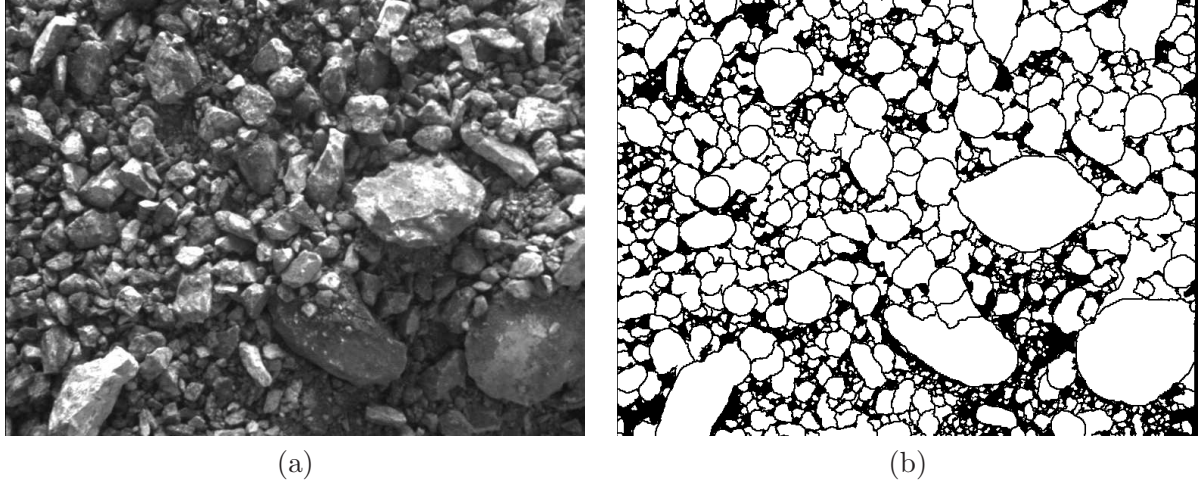


Fig. 5.1: (a) Image initiale de fragments qui se chevauchent avec présence de ségrégation, (b) Partition binaire où les zones noires correspondent au groupement et à la ségrégation des fragments

5.2 Test du modèle pour le cas des roches fragmentées

5.2.1 Résolution par l'hypothèse du schéma Booléen

5.2.1.1 Démarche théorique

La possibilité offerte, par le traitement d'images, lors de l'utilisation des modèles de structures aléatoires est que les caractéristiques morphologiques des éléments étudiés (grains primaires $A'(t)$ en l'occurrence) peuvent être estimées moyennant des transformations appliquées à l'image.

Les caractéristiques des surfaces peuvent être appréhendées à travers la granulométrie en surface comme suit :

$$\frac{\bar{\mu}_n(A') - \bar{\mu}_n((A' \ominus K) \oplus \check{K})}{\bar{\mu}_n(A')} \quad (5.1)$$

avec :

- $\bar{\mu}_n(A')$: la mesure moyenne de la surface du grain primaire A' (mesure de Lebesgue de \mathbb{R}^2),
- et $\bar{\mu}_n((A' \ominus K) \oplus \check{K})$: la mesure moyenne de la surface de l'ouvert du grain primaire A' par un élément compact K de taille donnée.

L'inférence de ces deux mesures à travers une réalisation aléatoire du modèle permettra d'accéder à la distribution granulométrique en surface (ou passants cumulés surfaciques) non biaisée par le recouvrement et le chevauchement.

Pour ce faire, la première hypothèse que nous testons suppose qu'après segmentation, l'image constitue une **partition de feuilles mortes**. Le domaine couvert par les surfaces $A'(t)$ des

fragments de la couche supérieure est ainsi un schéma Booleén d'intensité θt (Jeulin, 1993 [28]). On suppose enfin, que l'implantation des grains s'effectue de façon homogène en t .

Ceci permet de formuler les deux propriétés probabilistes suivantes :

$$P(K, t) = \frac{\bar{\mu}_n(A' \ominus \check{K})}{\bar{\mu}_n(A' \oplus \check{K})} (1 - Q(K, t)) \quad (5.2)$$

et

$$Q(K, t) = \exp(-\theta t \bar{\mu}_n(A' \oplus \check{K})) \quad (5.3)$$

avec :

- $P(K, t) = P\{K \subset A(t)\}$ est la probabilité que l'élément compact K soit inclus dans l'ensemble $A(t)$ (union de tous les grains),
- $Q(K, t) = P\{K \subset A^c(t)\}$ est la probabilité que l'élément compact K soit inclus dans le complémentaire de l'ensemble $A(t)$,
- $\bar{\mu}_n(A' \ominus \check{K})$ est la mesure moyenne de la surface de l'érodé de A' ,
- et $\bar{\mu}_n(A' \oplus \check{K})$ est la mesure moyenne de la surface du dilaté de A' .

Les deux probabilités $P(K, t)$ et $Q(K, t)$ peuvent être estimées par traitement d'images moyennant l'emploi de transformations morphologiques simples (érosions, dilatations ...).

$$P^*(K) \simeq P\{K \subset A\} = P\{x \in A \ominus \check{K}\} \quad (5.4)$$

et

$$Q^*(K) \simeq P\{K \subset A^c\} = P\{x \in A^c \ominus \check{K}\} \quad (5.5)$$

Pour ce faire, les deux images utilisées sont l'image binaire de la partition qui représente l'ensemble A , et son inverse réduite de la LPE (A^c).

A partir de ces deux probabilités, nous allons tenter d'estimer les termes de (5.1).

1. Estimation du terme $\bar{\mu}_n(A')$

(5.3) implique :

$$-\ln(Q(K, t)) = \theta t \bar{\mu}_n(A' \oplus \check{K}) \quad (5.6)$$

La mesure moyenne du grain primaire $\bar{\mu}_n(A')$ est estimée en calculant la probabilité $Q^*(K, t)$ pour K égal à un point x . Le grain primaire A' est, en effet, invariant par dilatation ponctuelle.

2. Estimation du terme $\bar{\mu}_n((A' \ominus K) \oplus \check{K})$

Le terme $\bar{\mu}_n((A' \ominus K) \oplus \check{K})$ peut être développé sous forme d'un polynôme de Steiner lorsque les particules étudiées sont **convexes** (Matheron et Serra [68]).

Si nous supposons que c'est le cas pour les fragments de roches étudiés, la mesure moyenne de la surface de l'ouvert de A' peut être développée comme suit :

$$\bar{\mu}_n((A' \ominus K) \oplus \check{K}) \simeq \bar{\mu}_n(A' \ominus K) + \frac{L(A' \ominus K) \times L(K)}{2\pi} + \bar{\mu}_n(K) \quad (5.7)$$

avec :

- $L(K)$ le périmètre du compact K ,
- $L(A' \ominus K)$ le périmètre de l'érodé,
- et $\bar{\mu}_n(K)$ la mesure moyenne de la surface du transposé de K .

Il en découle que l'accès à la mesure moyenne de la surface de l'ouvert passe par le calcul de la **surface** et le **périmètre de l'érodé** du grain primaire A' .

Par ailleurs, (5.2) montre que la mesure moyenne de la surface de l'érodé de A' peut se calculer comme suit :

$$\bar{\mu}_n(A' \ominus \check{K}) = \frac{P(K, t) \bar{\mu}_n(A' \oplus \check{K})}{1 - Q(K, t)} \quad (5.8)$$

L'accès à $\bar{\mu}_n(A' \oplus \check{K})$ est possible moyennant (5.6).

En effet, avec la même hypothèse de convexité cette fois-ci pour le dilaté $\bar{\mu}_n(A' \oplus \check{K})$, la formule de Steiner permet le développement suivant :

$$\bar{\mu}_n(A' \oplus \check{K}) \simeq \bar{\mu}_n(A') + \frac{L(A') \times L(K)}{2\pi} + \bar{\mu}_n(K), \quad (5.9)$$

$L(A')$ étant le périmètre du grain A' .

En outre, $Q^*(K, t)$ permet aussi d'estimer $L(A')$ et θt .

D'où la mesure moyenne de la **surface de l'érodé** $\bar{\mu}_n(A' \ominus \check{K})$.

Ensuite, en faisant varier la taille de K (accroissements de $\bar{\mu}_n(A' \ominus \check{K})$), nous pouvons calculer le périmètre de l'érodé comme suit :

$$\bar{\mu}_n(A' \ominus \check{K}) - \bar{\mu}_n(A' \ominus (K \oplus \delta l)) \simeq \delta l \times L(A' \ominus \check{K}) \quad (5.10)$$

D'où la mesure du **périmètre de l'érodé** $L(A' \ominus \check{K})$, et par conséquent celle de la **surface de l'ouvert** du grain primaire.

Nous avons ainsi accès à tous les termes de (5.1).

En dernier lieu, il est important de signaler que l'emploi de la mesure moyenne $\bar{\mu}_n$ (espérance) fait que la distribution des tailles calculée est une granulométrie en nombre. Une correction est donc à apporter pour obtenir la granulométrie surfacique en mesure (surface).

D'autre part, il faut rappeler que pour le calcul des termes de (5.1), les hypothèses suivantes ont été émises :

- le domaine couvert par la partition binaire est supposé un schéma Booléen d'intensité θt dans le cas homogène,
- et les grains primaires, représentant les surfaces des fragments, ainsi que leurs dilatés ont été supposés convexes pour l'application de la formule de Steiner.

Ces deux hypothèses sont donc à valider en fonction des données expérimentales.

5.2.1.2 Traitements expérimentaux

En ce qui concerne la démarche expérimentale suivie, l'élément structurant utilisé pour le calcul des caractéristiques des grains sera la meilleure approximation de l'élément isotrope selon la trame utilisée. Aussi, le compact K est remplacé par le disque $C(r)$ de rayon r dont l'élément transposé $\hat{C}(r)$ n'est autre que lui-même.

Les tests effectués concernent la même distribution des tailles du lot N°4 ($n_{3D} = 1,48$ et $Xc_{3D} = 24,66 \text{ mm}$ (27 Kg)) précédemment étudiée pour le premier cas de non-recouvrement et non-chevauchement (section 4.1.4).

Les fragments ont été déversés dans un bac dont les dimensions sont proportionnelles à celles des bennes des camions de transport (Hauteur = $77,5 \text{ cm}$, longueur = 44 cm et largeur = 33 cm). La méthode de déversement simule aussi celle utilisée in-situ et prend en compte aussi l'hypothèse des feuilles mortes (remplissage couche par couche). Les fragments ont été longuement mélangés avant déversement et ce, pour avoir une égale probabilité d'appartenance à la première couche (représentée par l'image).

Après la première acquisition (Fig. 5.2), la même opération a été reproduite dans les mêmes conditions donnant lieu à une autre image de la distribution (deuxième réalisation)(Fig. 5.13). L'objectif est de tester la robustesse de l'hypothèse du schéma Booléen à reproduire les mêmes résultats.

Au cours de la manipulation expérimentale, les phénomènes de ségrégation et de groupement des fragments de petites tailles ont été effectivement remarqués. Cependant les deux images de la distribution montrent la présence d'un large éventail de tailles de la distribution. Ce qui nous permet d'envisager que la première couche est apte à décrire correctement l'information sous-jacente.

a. Test sur la première réalisation

Le traitement d'images fournit l'image segmentée considérée comme une réalisation aléatoire du modèle (Fig. 5.3).



Fig. 5.2: Couche supérieure de fragments

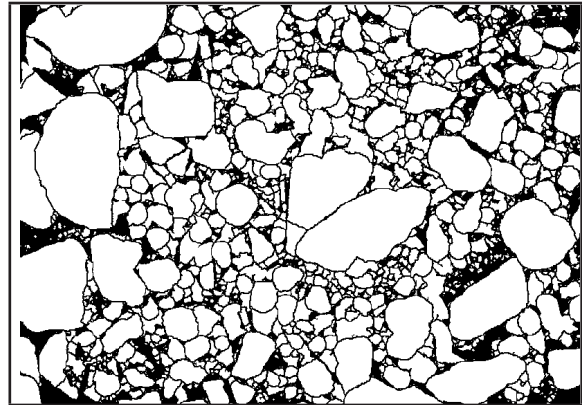


Fig. 5.3: Résultats de la segmentation : réalisation aléatoire du modèle (ensemble A)

$P^*(K)$ calculée par traitement d'images est tracée dans la figure 5.4.

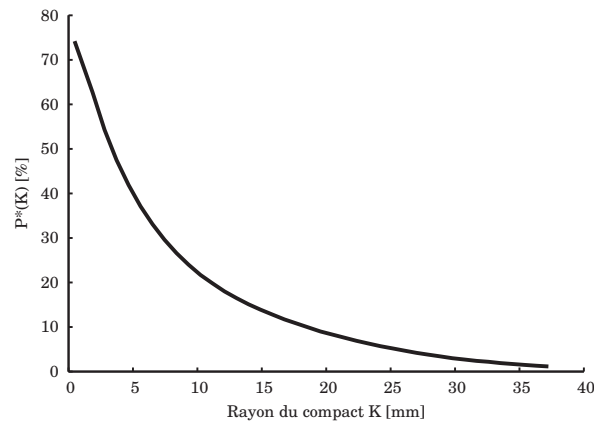


Fig. 5.4: $P^*(K, t)$

Le complémentaire de l'ensemble A est obtenu en opérant une différence ensembliste entre A est la LPE de l'image (Fig. 5.6 et 5.5).

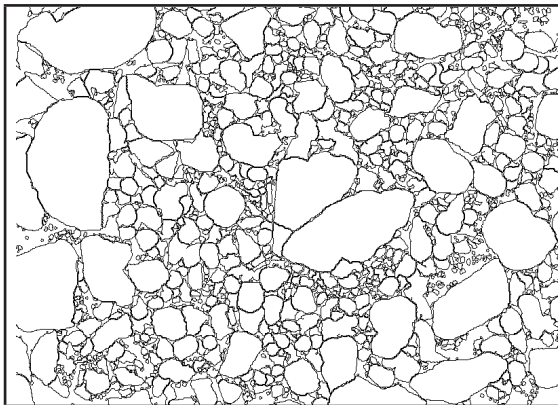


Fig. 5.5: Ligne de partage des eaux

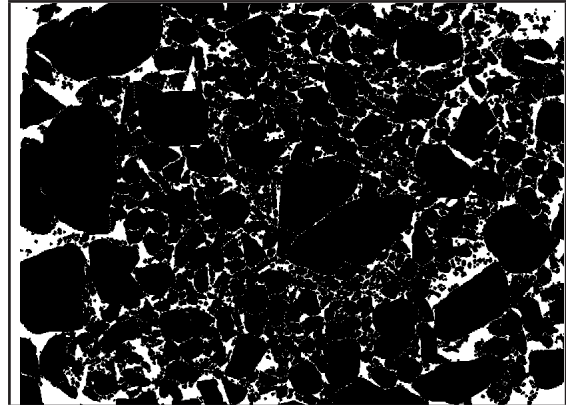
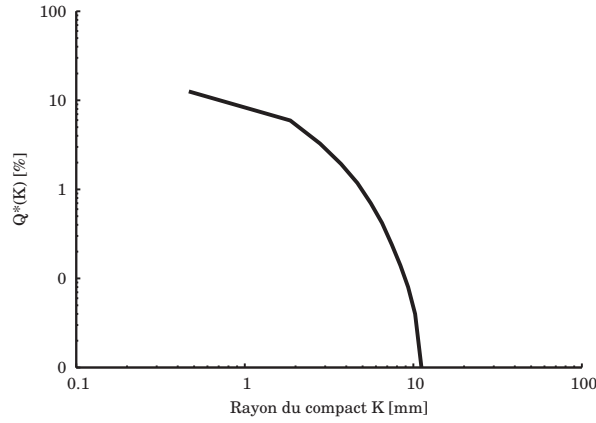


Fig. 5.6: complémentaire de l'ensemble A

De même, $Q^*(K)$ calculée par traitement d'images est tracée dans la figure 5.7

Fig. 5.7: $Q^*(K, t)$

L'allure de la courbe Q semble confirmer l'hypothèse du schéma Booléen.

Par ailleurs, l'ajustement du terme $-\ln(Q(K, t))$ (Eq. 5.4) à un polynôme de degré 2 permet d'estimer les trois grandeurs θt , $L(A')$ et $\bar{\mu}_n(A')$ (Eq. 5.7).

$$\theta t = 0,001025 \quad (5.11)$$

$$L(A') = 50,285 [mm] \quad (5.12)$$

$$\bar{\mu}_n(A') = 228,253 [mm^2] \quad (5.13)$$

Il en découle, la mesure moyenne de la surface de l'érodé (Eq. 5.6)(Fig. 5.8), son périmètre (Eq. 5.8)(Fig. 5.9), et la mesure moyenne de la surface de l'ouvert du grain primaire A' (Eq. 5.5) (Fig. 5.10). Puis enfin, les passants cumulés en surface sont calculés moyennant l'équation (5.1) (Fig. 5.11).

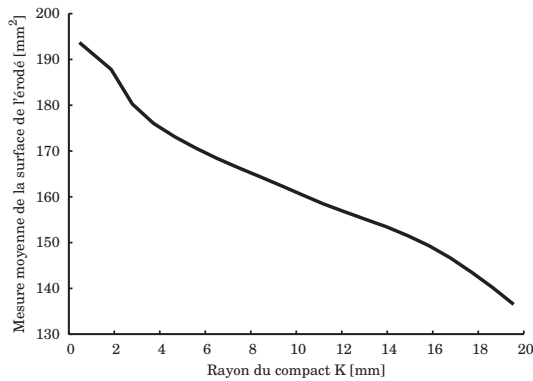


Fig. 5.8: Estimation de la surface de l'érodé

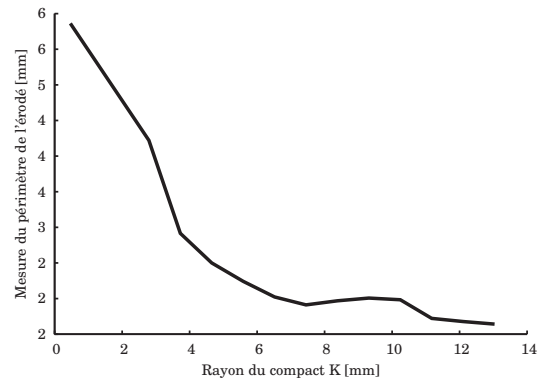


Fig. 5.9: Estimation du périmètre de l'érodé

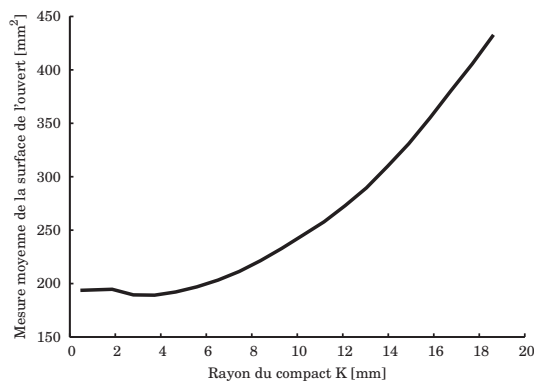


Fig. 5.10: Estimation de la surface de l'ouvert déduit de la partition

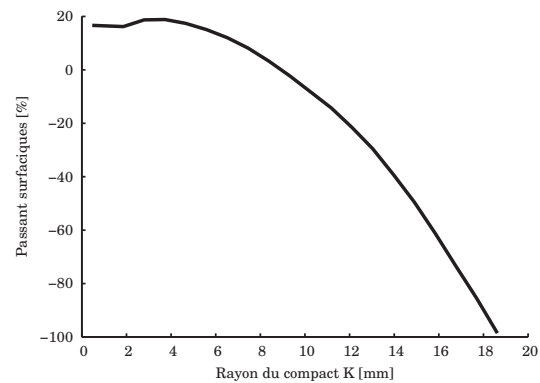


Fig. 5.11: Passants cumulés surfaciques

Commentaires des résultats de la première image

Les calculs effectués pour cette première image permettent de faire les constatations suivantes :

- l'évolution des courbes de la mesure moyenne de la surface de l'érodé et de son périmètre est en accord avec l'évolution de la taille du compact K ,
- cependant, la mesure moyenne de la surface de l'ouvert décroît jusqu'à la taille d'environ $2[mm]$ où la surface de l'ouvert augmente anormalement avec celle de K ,
- ceci se manifeste par le même biais au niveau de la courbe des passants en surfaces qui décroît anormalement à partir de la même taille, donnant lieu même à des passants cumulés négatifs.

Ces biais peuvent être expliqués par l'hypothèse émise sur la convexité des grains et de leurs dilatés qui semble en effet très forte.

Comme le montre le schéma (5.12), la dilatation opérée après l'érosion des grains concaves fait que des surfaces sont comptabilisées doublement, ce qui augmente la taille de la surface de l'ouvert.

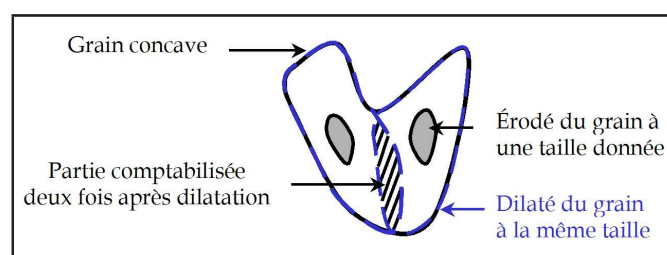


Fig. 5.12: Problème de convexité des grains pour la formule de Steiner

De plus, la formule de Steiner utilisée pour l'estimation est mise en défaut dans le cas des grains réels non convexes.

b. Test sur la deuxième réalisation

En plus de l'idée de départ qui consistait à vérifier la robustesse de la méthode à reproduire des résultats comparables, ce deuxième test a pour but de confirmer l'explication du problème de convexité par rapport à l'évolution de la mesure de la surface de l'ouvert.

Ainsi, les mêmes traitements ont été effectués à la deuxième réalisation du modèle (Fig. 5.14).



Fig. 5.13: Couche supérieure des fragments (test N°2)

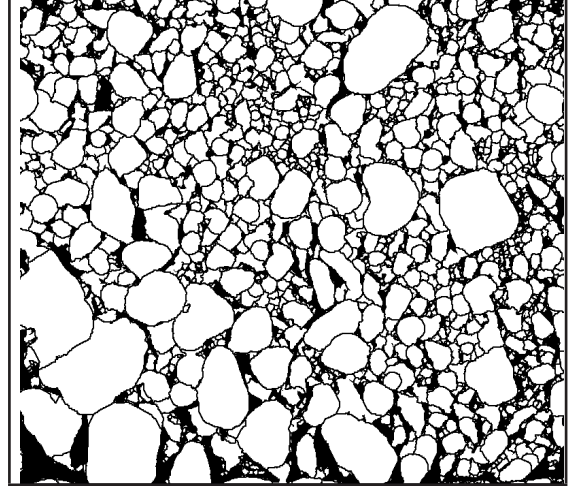


Fig. 5.14: Deuxième réalisation du modèle

La même séquence de calcul précédente permet de calculer les trois grandeurs :

$$\theta t = 0,00859 \quad (5.14)$$

$$L(A') = 26,8431 [mm] \quad (5.15)$$

$$\bar{\mu}_n(A') = 363,3542 [mm^2] \quad (5.16)$$

Le périmètre du grain primaire ainsi que la mesure moyenne de sa surface semblent en accord avec les tailles et les formes des fragments présents à l'image en comparaison avec les paramètres de l'image précédente (fragments plus allongés et distribution de la première couche plus étalée).

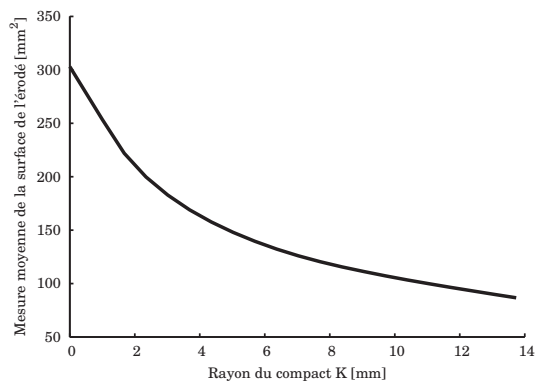


Fig. 5.15: Estimation de la surface de l'érodé

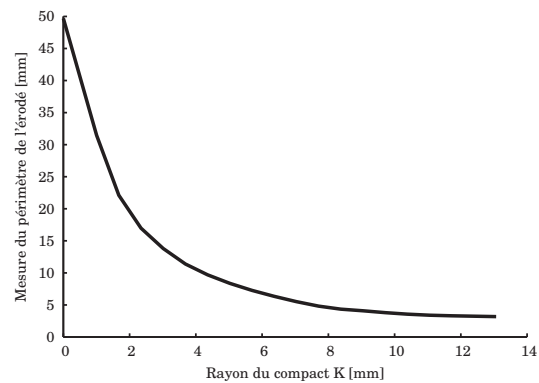


Fig. 5.16: Estimation du périmètre de l'érodé

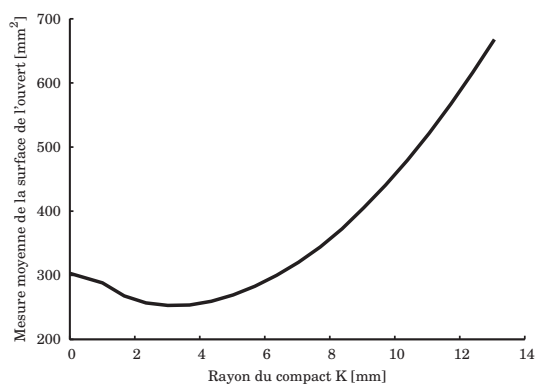


Fig. 5.17: Estimation de la surface de l'ouvert déduit de la partition

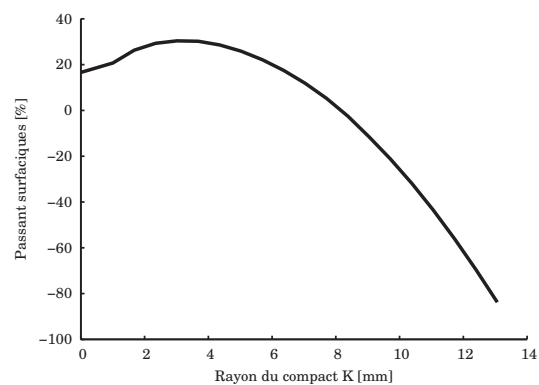


Fig. 5.18: Passants cumulés surfaciques

Commentaires

Notre démarche consistait à vérifier la validité de l'hypothèse de convexité pour l'application des développements en polynôme de Steiner des termes du dilaté et de l'ouvert. Nous avons constaté que, semblablement au premier test, à partir d'une certaine taille du compact K , la courbe de la surface de l'ouvert et celle des passants cumulés en surfaces évoluent en contradiction avec la taille de K . Ceci semble confirmer la non validité de l'hypothèse de convexité des grains pour la même raison évoquée auparavant.

Malgré que l'hypothèse du schéma booléen soit vérifiée (Fig. 5.4 et 5.7), il en ressort que cette démarche ne peut être correctement appliquée à notre cas de fragments de roches à cause de leur forme, manifestement trop écartée de la convexité.

5.2.2 Résolution par la statistique des grains intacts

Pour palier au problème lié à l'application de la formule de Steiner pour des surfaces de grains concaves, la deuxième méthode d'inférence des caractéristiques des surfaces issue du modèle de feuilles mortes qui sera envisagée est celle dite statistique des grains intacts (G. Matheron 1968 et Jeulin, 1993) [27]. La méthode est basée exclusivement sur les propriétés probabilistes des grains intacts de la couche supérieure de l'image.

Par traitement d'images, il s'agit d'extraire les grains intacts, ne subissant aucun masquage, de la couche supérieure de la distribution des fragments. Les grains masqués seulement par ces grains intacts constitueront ainsi la deuxième couche de l'image et ainsi de suite jusqu'à définition des différentes couches visibles à l'image. Les différentes couches sont par définition du modèle de feuilles mortes des schémas Booléens infinitésimaux.

Le principe de la méthode est qu'il est possible d'inférer les caractéristiques de toute la fragmentation une fois calculées celles des grains intacts. Au sein de chaque classe, chacun de ces derniers est supposé une réalisation aléatoire indépendante d'un grain primaire hypothétique.

5.2.2.1 Démarche théorique

Rappelons que l'objectif poursuivi est de calculer les surfaces des grains de la distribution après correction des problèmes dus au masquage. Cette information sera appréhendée à travers les différents histogrammes surfaciques en nombre équivalents à chaque classe.

Pour chaque classe de taille a , l'extraction des grains intacts permet de calculer l'histogramme $\varphi_{iA'_a}$ des grains intacts A'_a .

Pour le cas homogène et lorsque t tend vers l'infini, la théorie de la statistique des grains intacts permet de calculer l'histogramme en nombre des grains intacts de taille a , comme suit :

$$\varphi_{iA'_a} = \frac{N_i(A'_a)}{N_i} = \frac{\varphi_{A'_a}}{N_i \bar{\mu}_n(A'_a \oplus \check{A}')} \quad (5.17)$$

où :

- A' est l'union de tous les grains de la population ;
- $\varphi_{A'_a}$ est l'histogramme en nombre des grains de la classe de taille a , il constitue l'**information recherchée** pour chaque classe ;
- $\bar{\mu}_n(A'_a \oplus \check{A}')$ est la mesure moyenne de la surface du dilaté du grain intact de taille a par la population des grains ;
- $N_i(A'_a)$ est le nombre des grains intacts de taille a ;
- et N_i est le nombre total des grains intacts (accessible par traitement d'images).

De façon générale, la procédure d'estimation de $\bar{\mu}_n(A'_a \oplus \check{A}')$ par traitement d'images dépendra de trois cas de figures possibles :

1. pour le premier où les **grains** peuvent être **convexes**, on peut appliquer la formule de Steiner à la relation (5.3), ce qui fournit la mesure du périmètre et celle de la surface moyenne du grain A' . Il en découle la mesure moyenne $\bar{\mu}_n(A'_a \oplus \check{A}')$.
2. Pour un échantillon de **grains non convexes** mais possédant une **zone non recouverte** (représentée en noir sur l'image binaire) : il suffit de dilater l'union des grains par A'_a et d'utiliser la relation (5.3), où A'_a remplace le compact K .
3. Enfin, dans le cas de **grains non convexes et d'un recouvrement total** (très peu de zones noires sur l'image binaire), une estimation "approchée" de $\bar{\mu}_n(A'_a \oplus \check{A}')$ pourra être donnée par traitement d'images en prenant le grain A' comme l'union de tous les grains intacts A'_a seulement.

Il faut remarquer à ce niveau que, le cas le plus probable étant celui de grains non convexes, les deux dernières façons de procéder permettent d'éviter l'hypothèse "forte" de convexité pour le calcul du dilaté.

Une fois calculé $\varphi_{A'_a}$ pour la classe de taille a , l'histogramme $\varrho_{A'_a}$ en surfaces des grains est donné par :

$$\varrho_{A'_a} = a \frac{\varphi_{A'_a}}{E(a)} \quad (5.18)$$

Avec

$$\int_0^a \varphi_{A'_a} da = 1 \quad \text{ou} \quad \left(\int_0^a (N_i \bar{\mu}_n(A'_a \oplus \check{A}')) \varphi_{iA'_a} da = 1 \right) \quad (5.19)$$

et

$$\int_0^a \varrho_{A'_a} da = \text{Surface totale} \quad (5.20)$$

5.2.2.2 Extraction des grains intacts : ombres portées par les fragments

L'information qui a été jugée utile pour l'extraction des grains intacts est celle de l'ombre portée par ces derniers sur les autres fragments voisins. Ainsi, la détermination par traitement d'images des grains intacts passe par la détection des ombres portées sur les autres fragments.

Cependant, l'extraction de l'ombre portée à partir des images actuellement acquises s'est montrée problématique. En effet, l'angle de l'incidence de l'éclairement constant sous lequel les images sont acquises n'est pas suffisant pour disposer correctement de l'ensemble des ombres portées de l'images :

- d'un côté, en fonction de l'angle d'incidence, seules quelques ombres portées peuvent être mises en valeurs dans l'image.

- D'un autre côté, l'intensité des régions équivalentes aux ombres portées n'est pas assez distinguable des autres régions de l'image de même niveau de gris (Fig. 5.19) (moyennant un chapeau haut de forme par exemple).



Fig. 5.19: Ombres portées à mettre en valeur

Pour remédier aux insuffisances actuelles des traitements d'images par rapport à une extraction correcte des ombres portées par les fragments, une démarche expérimentale permettant de disposer d'un maximum d'ombres portées sur l'image a été donc élaborée. Basée sur une incidence variable de la lumière, elle s'inspire de la méthode dite de «Shape-from-shading» utilisée en stéréoscopie.

Principe de la méthode expérimentale

L'idée est de faire varier l'angle d'incidence de l'éclairement pour la même image de fragments de roches. Le regroupement des images équivalentes aux différents angles permet de disposer d'un maximum d'ombre portée par fragment. Le schéma (5.20) illustre le principe de la méthode suivant une direction d'éclairement donnée.

Dispositif expérimental

Le dispositif conçu pour l'expérience est constitué de deux lampes placées sur deux supports métalliques leur permettant une hauteur de fixation réglable. L'espacement horizontal entre les deux lampes est sensiblement égal à celui utilisé pour le cas du convoyeur à bandes (Fig. 5.21). Le support de l'appareil numérique d'acquisition est à une hauteur fixe par rapport à l'éventuelle surface des fragments.

Le changement de l'angle d'incidence est effectué en faisant varier simultanément la hauteur des deux lampes d'éclairement. Une image de la même surface de fragments est acquise chaque fois que la hauteur est modifiée. Pour éviter des problèmes de flou sur l'image qui résultera du groupement des différentes images, les deux dispositifs "éclairage" et "acquisition" sont

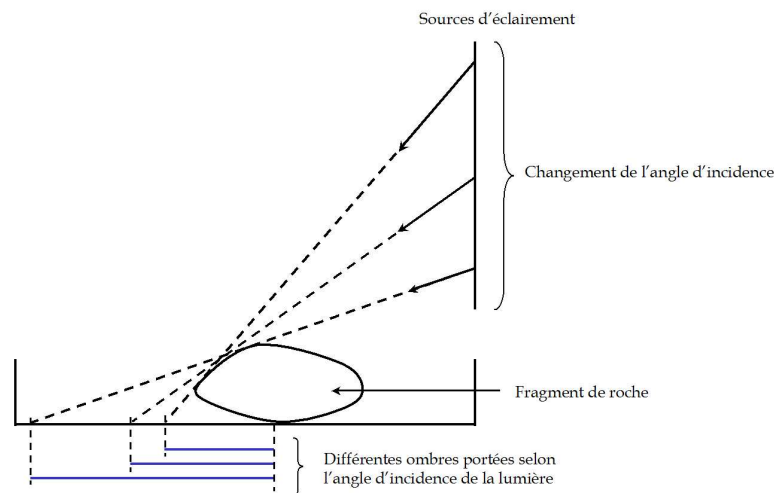


Fig. 5.20: Incidence variable d'éclairage pour la même image



Fig. 5.21: Dispositif expérimental d'éclairage avec incidence variable

désolidarisés. Ainsi, la manipulation des lampes, lors du changement de l'angle d'incidence, ne conduit pas à un déplacement de l'appareil numérique.

La hauteur des deux lampes peut varier entre 24 et 72 *cm*. Les différentes hauteurs intermédiaires, utilisées pour le changement de l'angle d'incidence, sont espacées de 12 *cm*.

Acquisition des images

La granulométrie expérimentale utilisée est toujours celle du lot *N*°4, étudiée dans le chapitre précédent. Les acquisitions de la surface des fragments, effectuées sur cinq hauteurs intermédiaires, ont fourni les images suivantes :

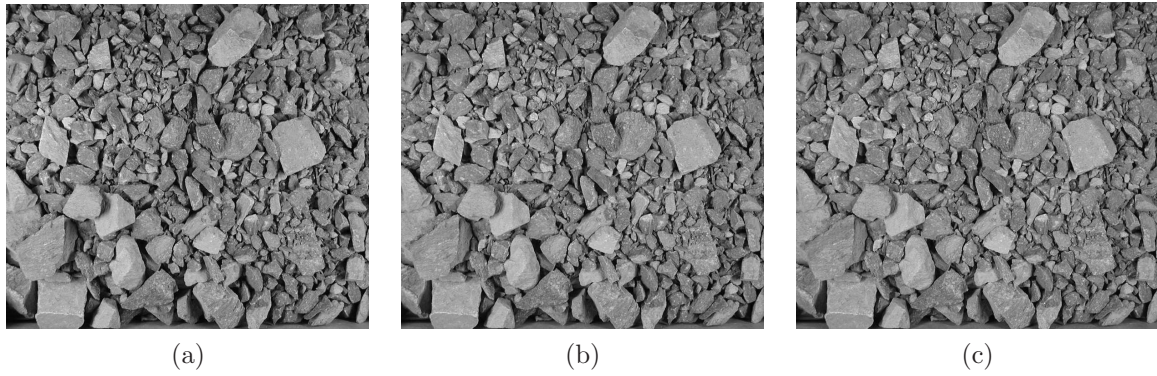


Fig. 5.22: (a) Incidence équivalente à la hauteur 24 *cm*, (b) Incidence équivalente à la hauteur 36 *cm*, (c) Incidence équivalente à la hauteur 48 *cm*

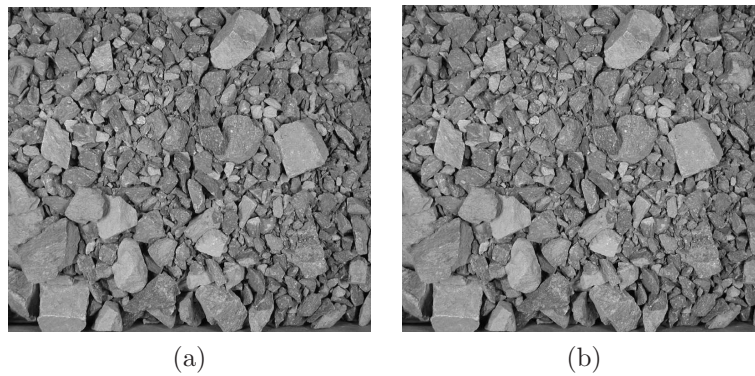


Fig. 5.23: (a) Incidence équivalente à la hauteur 60 *cm*, (b) Incidence équivalente à la hauteur 72 *cm*

Le groupement des cinq images donne deux images intéressantes : le Supremum (Sup) et l'Infimum (Inf) (Fig. 5.24-a et 5.24-b).

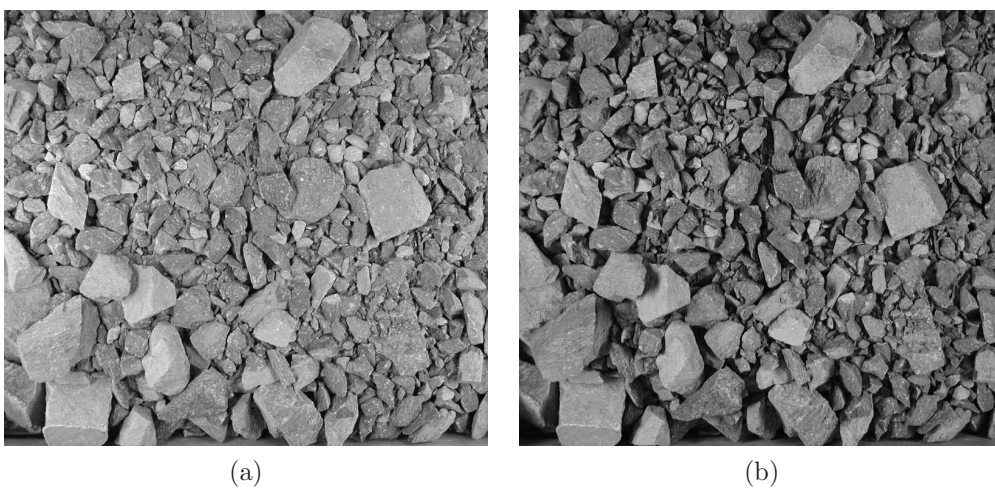


Fig. 5.24: (a) Supremum des différentes incidences, (b) Infimum des différentes incidences

Remarques

Les deux images montrent que :

- le Sup contient un maximum d'information sur les fragments avec notamment peu d'ombres portées sur les fragments, ce qui nous permet d'envisager un meilleur positionnement des contours de l'image moyennant une segmentation par LPE (ie : sans que la position des contours soient biaisée par les ombres portées).
- L'image Inf par ailleurs montre qu'on dispose d'un maximum d'information sur les zones d'ombres entre fragments et les ombres portées par ces derniers. En conséquence, elle constituera l'image sur laquelle se baseront les traitements d'images pour l'extraction des ombres portées puis celle des grains intacts.

Traitement des images

Il s'agit à ce niveau d'extraire correctement les ombres portées sans que les zones d'ombres entre fragments et les textures sombres qui existent sur leurs surfaces n'interfèrent avec l'extraction. En effet, ces deux informations présentent l'inconvénient d'avoir un niveau de gris sensiblement proche de celui des ombres portées. Deux informations sont donc à séparer : les **ombres portées** et les **zones sombres formées** par les contours et les textures.

Pour ce faire, le critère de distinction fixé, s'inspirant des cas de figures réels, suppose que les ombres portées extraites doivent vérifier deux conditions :

- après segmentation de l'image, elles doivent se situer à l'intérieur de la partition équivalente au fragment en question,
- les ombres doivent toucher la frontière du fragment (définie par LPE).

Les autres zones "sombres" qui ne satisferont pas ces deux conditions seront ou bien les zones de contours entre fragments ou les textures sombres situées à l'intérieur des fragments.

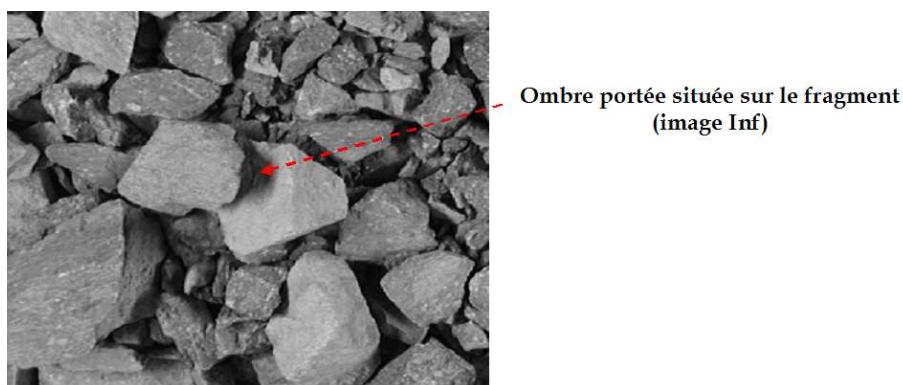


Fig. 5.25: Ombre portée située sur le fragment et qui touche le contour

La procédure d'extraction des grains intacts adoptée, utilise les deux images Sup et Inf définies précédemment (Fig. 5.24-a et 5.24-b).

- En premier lieu, les deux images ont été pré-filtrées par *FAS* de taille 10 avec reconstruction. Ensuite, un bouchage de trous a été effectué sur l'inverse des deux images (Fig. 5.26-a et 5.26-b).

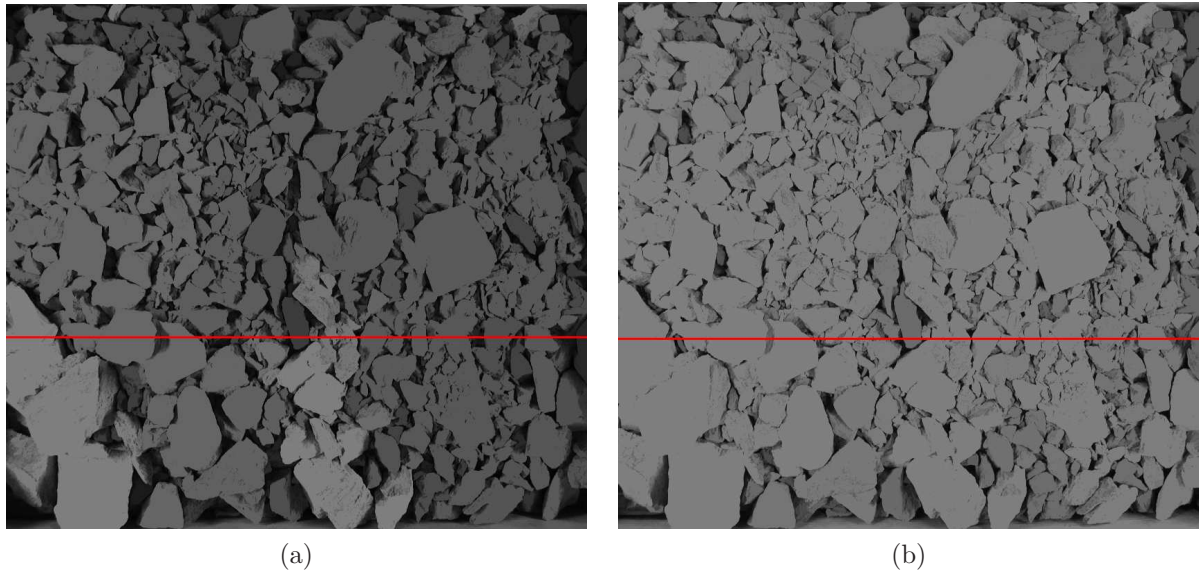


Fig. 5.26: (a) Image Inf filtrée par *FAS* de taille 10 suivi d'un bouchage de trous, (b) Image Sup filtrée par *FAS* de taille 10 suivi d'un bouchage de trous

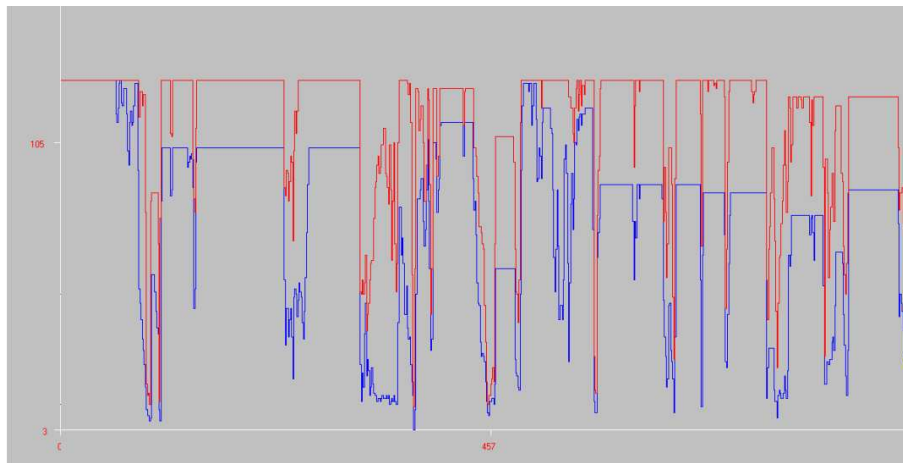


Fig. 5.27: Niveaux de gris des deux images Inf filtrée (bleue) et Sup filtrée (rouge)

- L'image (Fig. 5.27) montre le profil des sous-graphes des fonctions numériques équivalentes à l'Inf et au Sup. Comme on pouvait s'y attendre, ni les zones d'ombres ni les ombres portées ne sont affectées par les filtrages. Ceci est dû notamment au fait que ces structures ne constituent pas des trous dans les images inverses.

Par ailleurs, lorsqu'on compare les niveaux de gris entre les deux images, on constate que les décalages entre les niveaux équivalents aux ombres portées sont plus grands que ceux constatés entre les régions des fragments.

Comme on peut le constater sur l'image (Fig. 5.28) qui correspond à la différence du Sup et de l'Inf, les zones d'ombres portées sont codées avec les plus grands niveaux de gris. Par conséquent, un seuillage adéquat permet de séparer entre :

- les ombres portées,
- et les surfaces et les zones de contours entre fragments (Fig. 5.29).

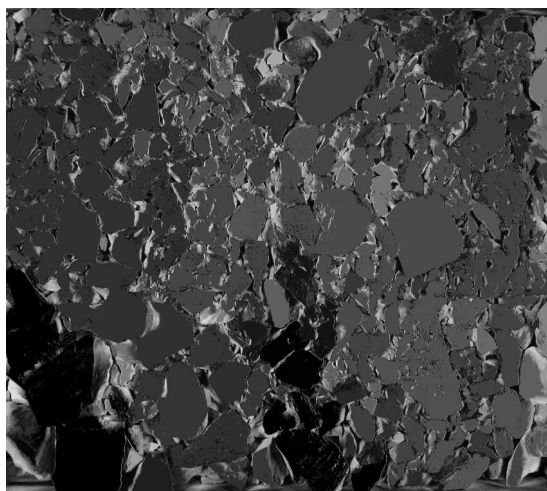


Fig. 5.28: Différence entre les images Sup et Inf filtrées

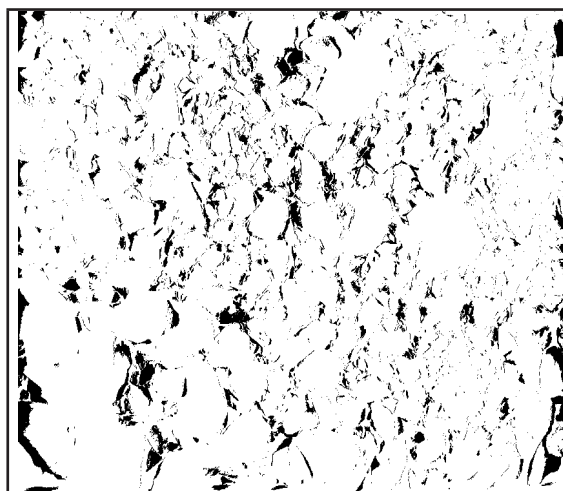


Fig. 5.29: Ombres portées par seuillage

L'image Sup est segmentée par la même méthode décrite dans le deuxième chapitre (Fig. 5.30-c). Puis les grains non-intacts qui correspondent aux ombres portées situées à l'intérieur des partitions et ne touchant pas la LPE sont éliminés (critère de séparation). Ceci nous permet d'obtenir les grains intacts extraits par cette procédure (Fig. 5.30-d).

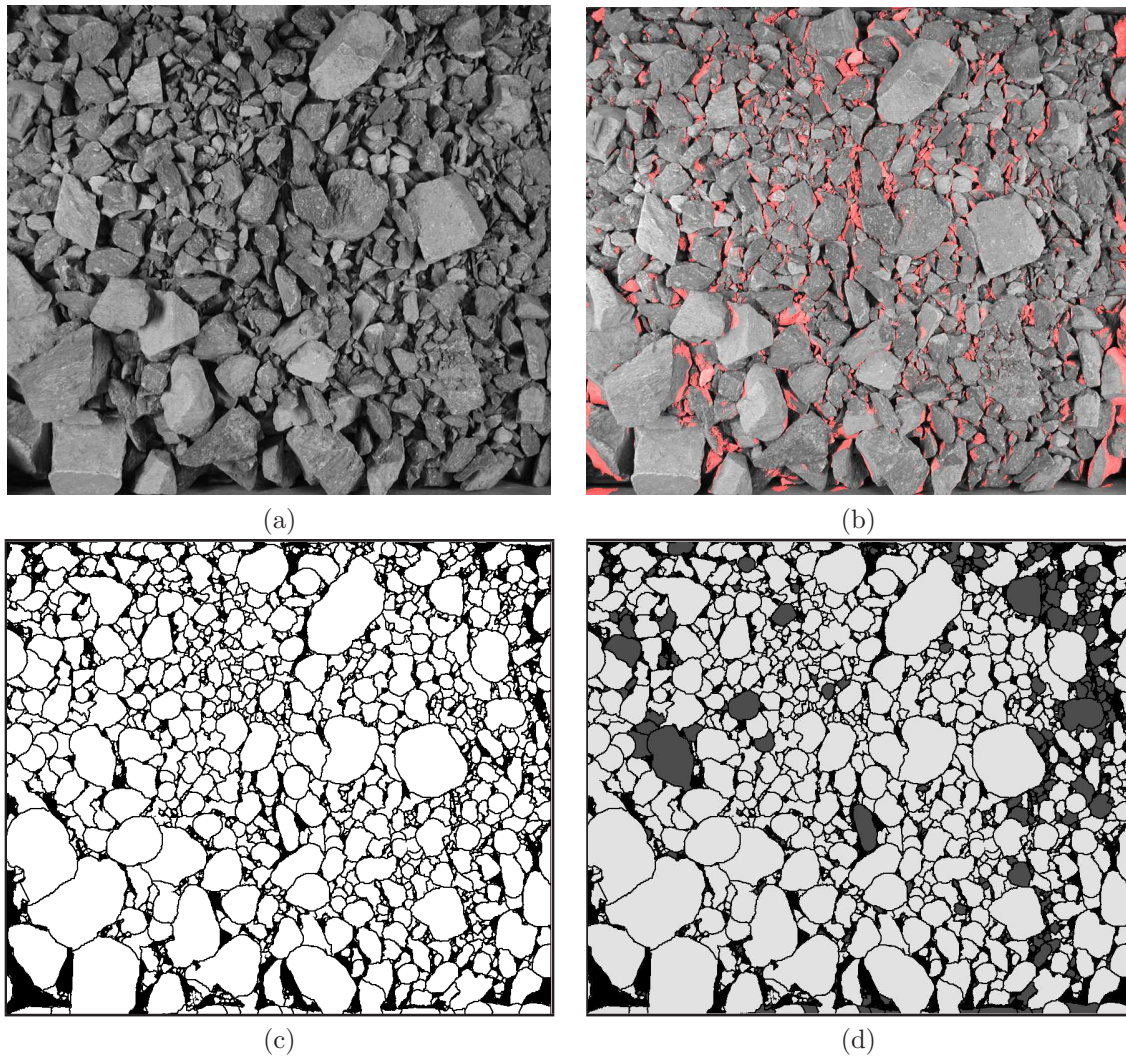


Fig. 5.30: (a) Image Inf, (b) Superposition des ombres portées extraites par le critère de séparation retenu , (c) Partition binaire obtenue par segmentation de l'image Sup, (d) Grains intacts extraits (gris foncé)

5.2.2.3 Synthèse et limites

Le résultat d'extraction des grains intacts montre que :

le nombre des grains intacts extraits par le critère de séparation retenu est nettement sous-estimé. Ceci s'explique par le fait, qu'une partie importante d'ombres portées ne touchant pas les frontières, a été éliminée.

Il s'ensuit que bien que les deux images Sup et l'Inf, issues de la variation des incidences, fournissent une information intéressante sur les ombres portées, l'extraction de ces dernières est à améliorer. De plus, le marquage utilisé lors de la construction de la LPE sur le Sup devra inclure l'information de l'ombre portée pour ce type d'application. Ceci permettra d'avoir des frontières plus fidèles à la réalité, et forcément utiles pour ce genre d'application.

Calculs granulométriques

Les calculs granulométriques qui suivent vont permettre de comparer les trois distributions de tailles suivantes :

1. Les grains intacts précédemment extraits,
2. Tous les grains de la première couche,
3. La granulométrie de référence entière (tamisage).

L'objectif poursuivi est double. En effet, il s'agit en premier lieu de constater numériquement les limites précédentes d'extraction des grains intacts. En second lieu, il s'agit de valider l'intérêt de la prise en compte des problèmes liés au chevauchement et au recouvrement que la démarche décrit dans ce chapitre a tenté de résoudre.

Les volumes et les tailles des surfaces des grains de la première couche (grains intacts ou non) seront ainsi calculés par la méthode de reconstruction granulométrique développée dans le chapitre précédent (Loi des tailles et loi des épaisseurs).

Notons enfin la partie de distribution de référence qui correspond aux grains de taille $< 8\text{mm}$ (pris comme particules fines), ne sera pas comptabilisée lors des calculs granulométrie. En effet, cela permettra d'éviter l'introduction de biais dus à ces particules qui, en subissant la ségrégation, n'apparaissent pas sur l'image.

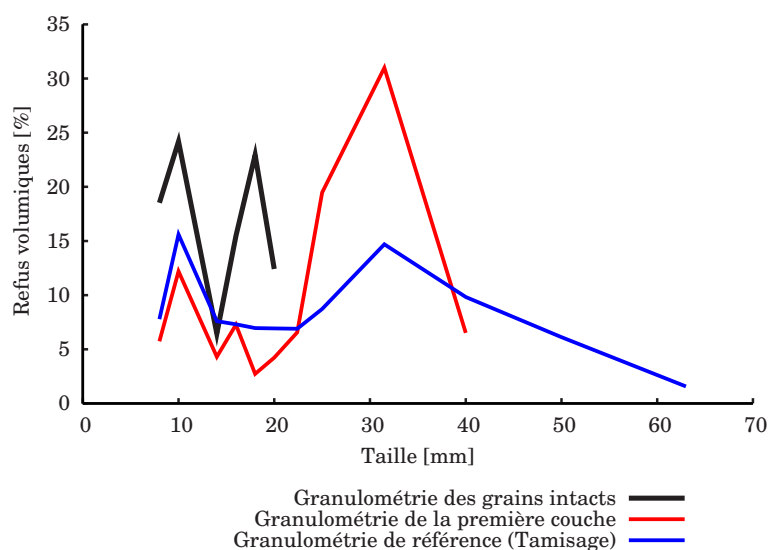


Fig. 5.31: Histogrammes équivalents aux différentes distributions

les deux histogrammes normalisés obtenus (Fig. (5.31), semblent ainsi confirmer le fait que ni les grains intacts ni les grains de la couche supérieure (image) ne peuvent renseigner correctement sur la granulométrie de référence.

5.3 Conclusion du chapitre

Lors de ce dernier chapitre, l'intérêt a été porté sur l'étude du problème de chevauchement et de recouvrement pour le calcul correct de la distribution des tailles des fragments. Le modèle de feuille mortes, qui s'est montré le plus adapté à notre structure de roches fragmentées, a été exploré suivant deux méthodes.

- En premier lieu, la démarche théorique de l'hypothèse du schéma booléen a été explicitée, et ses limites ont été sondées et clarifiées. Ainsi, les calculs expérimentaux ont montré que l'hypothèse de **convexité des grains est trop forte**. L'hypothèse est, en effet, utile à l'application de la formule de Steiner pour le calcul de l'ouvert des éléments.
- La seconde méthode est celle basée sur la statistique des fragments intacts. De même, sa démarche théorique (permettant de remonter, en principe, à la granulométrie "exacte" de référence) ainsi que son application à notre cas d'images ont été explicitées. L'utilité de l'extraction des fragments intacts de la première couche de l'image nous a conduit à élaborer une **nouvelle technique d'acquisition** des images, basée sur un éclairage à incidence variable. Les acquisitions ont montré qu'il était possible d'extraire un autre genre d'information à partir des images de fragment de roches : celui de **l'ombre portée qui renseigne sur le masquage notamment**. Néanmoins, la technique utilisée pour l'extraction de cette dernière s'est montrée peu concluante. Nous n'avons malheureusement pas pu l'améliorer faute de temps, mais nous restons convaincus de l'utilité de tels développements ainsi que d'une réflexion plus poussée sur l'adaptation du dispositif expérimental aux conditions industrielles.

Conclusions et Perspectives

Conclusions

L'objectif de ce travail a été d'améliorer les méthodes de quantification de la granulométrie des roches fragmentées par analyse d'images. Pour cela, un vaste domaine de travail a dû être couvert. Conscients des insuffisances classiquement liées à une démarche qui s'intéresserait uniquement à la correction des résultats finaux des traitements, nous avons opté pour une position du problème qui permet de corriger les erreurs inhérentes à chacune des étapes de la séquence de mesure. Ceci rejoint l'objectif d'intégrer les améliorations apportées dans un outil destiné au contrôle continu du tir à l'explosif en site minier. Nos apports ont porté principalement sur :

- une meilleure extraction de l'information des surfaces des fragments présents dans les images,
- une modélisation correcte du calcul des tailles et des volumes pour le cas simple d'images représentant des fragments qui ne se chevauchent pas et ne se recouvrent pas,
- une étude détaillée du problème du masquage entre fragments.

Extraction des surfaces 2D

Lors de cette étape clé de la séquence de calcul de la courbe granulométrique, nous avons opté pour une extraction complète des contours des fragments. En effet, le niveau de gris des images n'étant pas un indicateur du relief réel des fragments, l'information principale à extraire est celle des surfaces. Ceci a été rendu possible grâce à une étude plus approfondie de l'aspect topographique des images de fragments de roches. La définition des contours a été menée à travers la construction de la ligne de partage des eaux contrôlée par les marqueurs. Ces derniers ont été calculés par une nouvelle technique basée sur les opérateurs morphologiques résiduels (*contrôle des Sup des résidus*). Pour surmonter les problèmes liés au positionnement des contours, deux possibilités de calcul des gradients ont été explorées :

- pour des images irrégulièrement contrastées, les gradients ont été calculés sur les images filtrées par bouchage de trous,
- pour le cas des images correctement contrastées, les gradients calculés sur la fonction granulométrique ont permis d'obtenir des contours très fidèles à la réalité.

Reconstruction de la courbe granulométrique en volumes

– Calcul des tailles et des volumes

Le problème du calcul des tailles et des volumes a été abordé en tenant compte du fait que la référence de la mesure est le tamisage. Nous avons ainsi évité une modélisation théorique des formes des fragments qui aurait recours au final à des calibrages avec les données du tamisage. La démarche expérimentale que nous avons élaboré est simple par le fait qu'elle consiste à se baser d'emblée sur la comparaison avec le tamisage. La modélisation a abouti à deux lois reliant les surfaces extraites par traitement d'images respectivement aux tailles et aux volumes "réels" des fragments : **loi des tailles et loi des épaisseurs**. Validées sur une roche fragmentée dans des conditions de sites miniers, ces deux lois se sont avérées robustes.

– Masquage entre fragments

L'application directe des deux lois de reconstruction à des images représentant des fragments subissant un masquage s'avère non pertinente. C'est ainsi que notre intérêt a porté sur l'étude du problème de chevauchement et du recouvrement entre fragments. Ce dernier a été abordé à travers le modèle aléatoire de feuilles mortes. La première tentative d'inférence des caractéristiques exactes des surfaces, nécessitant une hypothèse sur la convexité des fragments, manifestement très forte, ne s'est pas montrée concluante. La seconde méthode qui a été testée est celle de la statistique des grains intacts. Pour ce faire, nous avons élaboré une nouvelle technique d'acquisition, basée sur un éclairage à incidence variable, qui a fourni une information supplémentaire sur le masquage : **l'ombre portée entre les fragments**.

Perspectives

Extraction de l'information 2D

Dans la suite de nos travaux concernant l'étape 2D, il nous paraît intéressant d'améliorer le positionnement de certains contours de fragments (allongés par exemple). Ceci pourra être envisagé en éliminant tous les contours qui ne correspondent pas à des gradients élevés, et aussi en étudiant une adaptation plus générale du critère de taille utilisé lors du contrôle des Sup qui tienne compte de la forme et de la taille très variables de tous les fragments de l'image .

Extension des lois de la reconstruction expérimentale 3D

Il serait important d'étudier l'existence de corrélations entre les deux lois de reconstruction expérimentale et les indices de forme des fragments. Ceci permettra une **modélisation théorique de ces deux lois**, d'où une extension possible à d'autres types de roches provenant de sites différents et à des intervalles de tailles plus larges que ceux rencontrés lors de l'étude des granulats (telles que celles mises en jeu lors des études des enrochements et de la blocométrie).

Masquage : statistique des grains intacts

- L'amélioration de l'extraction de l'information des grains intacts est très utile dans la mesure où elle permettra d'appliquer correctement la statistique des grains intacts pour corriger les erreurs dues au masquage. De plus, une réflexion plus poussée sur l'**adaptation**

industrielle de la nouvelle technique d'acquisition basée sur la variation de l'incidence de l'éclairage permettra d'améliorer l'automatisation de la mesure en terme de corrections finales.

- Dans le même contexte, la comparaison du positionnement des contours extraits par les deux techniques de segmentation (gradient calculés sur l'image pré-filtrée et gradients calculés sur la fonction granulométrique) montrent que les deux méthodes se valent pratiquement. Cependant, une **extension de la technique de “mise à zéro”** pour le cas des images dont les fragments ne sont pas correctement contrastés, devrait améliorer le positionnement des contours par rapport aux ombres portées. Une telle amélioration s'avèrerait utile pour une bonne extraction des grains intacts.

Modèle de ségrégation des fines

Par ailleurs, la validation de la correction des erreurs dues au masquage devrait être suivie de l'établissement d'un modèle de la ségrégation particulière que connaissent les particules fines et qui **ne sont ainsi pas prises en compte** par le modèle de feuilles mortes.

Théorie de P.Gy

A plus long terme, concernant les cas où les images sont acquises sur le tas ou sur les camions, l'accès à la totalité de la distribution des tailles n'étant que partielle, une adaptation de la théorie d'échantillonnage des matières morcelées de P.Gy au cas du traitement d'images serait d'un grand intérêt pour remonter à l'ensemble de la granulométrie du tas.

Extension de la technique à d'autres domaines d'activités

Il serait aussi intéressant d'explorer l'extension de la technique de segmentation développée à d'autres domaines industriels (agroalimentaire, cimenterie, pharmaceutique,...) en regardant de près les attentes particulières de ces derniers. En effet, le test de la méthode sur des images de graines et de ciment a fourni aussi des résultats très satisfaisants (Fig 5.32).

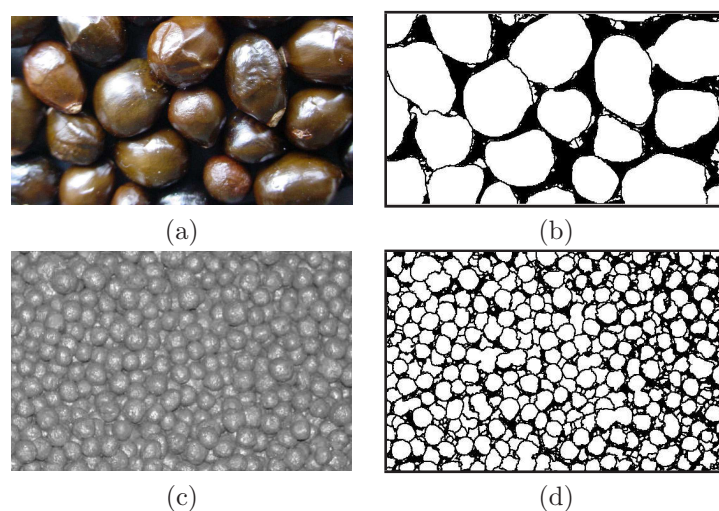


Fig. 5.32: (a) Graines, (b) Résultats de la segmentation la segmentation, (c) ciment, (d) Résultats de la segmentation

Table des figures

1	Image de fragments de roches avec problèmes de bruit	2
2	(a) Image initiale de fragments de roches, (b) Extraction des surfaces des fragments	2
1.1	Courbe granulométrique expérimentale par tamisage	9
1.2	Taille d'un fragment par la méthode de la ficelle	10
1.3	Diamètre de Féret minimal	11
1.4	Diamètre du cercle équivalent de même surface	11
1.5	étape de mesure de la distribution des tailles par analyse d'images	12
1.6	Différentes valeurs du paramètre d'uniformité n pour le modèle de Rosin-Rammler	14
1.7	Ajustement du modèle de Rosin-Rammler aux données expérimentales	15
1.8	(a) Images initiale, (b) Résultat des traitements $2D$ pour le cas de FragScan : seuillage par maximisation de la variance interclasses après homogénéisation locale	17
1.9	(a) Images initiale, (b) Problèmes d'extraction des contours : fusion des régions de fines et sur-segmentation des fragments	17
1.10	(a) Histogramme unimodal, (b) Histogramme avec deux modes	20
1.11	Correction des fines - méthode de Split	21
1.12	Organigramme général de résolution	23
1.13	Problèmes étudiés et démarche de résolution	25
2.1	(a) Image initiale f , (b) ��rosion par un disque de taille 5 : $\epsilon_B(f)$, (c) Dilatation par un disque de taille 5 : $\delta_B(f)$	31
2.2	(a) Coupe horizontale de l'image, (b) Fonctions numériques associées	31
2.3	(a) Image initiale, (b) Gradient associé $^1 : \Delta(f)$, (c) Fonctions numériques	32
2.4	(a) Image initiale, (b) Gradient associé : $\Delta(f)$, (c) Fonctions numériques	32
2.5	Ensemble binaire initial : X	33
2.6	Fonction distance associée : d_X	33
2.7	(a) Ensemble binaire initial, (b) Ouverture par un disque de taille 30 : $\gamma_B(X)$, (c) Fermeture par un disque de taille 10 : $\varphi_B(X)$	34

2.8	(a) Image initiale, (b) Ouverture par un disque de taille 5 : $\gamma_B(f)$, (c) Fermeture par un disque de taille 5 : $\varphi_B(f)$	34
2.9	(a) Fonctions numériques de l'image initiale et de son ouvert, (b) Fonctions numériques de l'image initiale et de son fermé	35
2.10	(a) Image initiale, (b) Supremum d'ouvertures linéaires de taille 12, (c) Infimum de fermetures linéaires de taille 12	36
2.11	(a) Fonctions numériques de la fonction initiale et du Supremum d'ouvertures linéaires de taille 12, (b) Fonctions numériques de la fonction initiale et de l'Infimum de fermetures linéaires de taille 12	36
2.12	Fragments de roches fortement texturés et présence de fines regroupées	37
2.13	Fragments de roches texturés avec fines regroupées sur les gros fragments	37
2.14	Présence de fines regroupées et déposées sur gros fragments	37
2.15	Éclairement rasant et non-uniforme sur l'ensemble de l'image	37
2.16	(a) Ensemble binaire initial, (b) Ouverture par un disque de taille 30, (c) Ouverture avec reconstruction par un disque de taille 30	40
2.17	(a) Image numérique initiale, (b) Ouverture par un disque de taille 5, (c) Ouverture avec reconstruction par un disque de taille 5	40
2.18	(a) Coupe horizontale de l'image, (b) Fonctions numériques associées	40
2.19	(a) Image numérique initiale, (b) FAS de taille 12 sans reconstruction, (c) FAS de taille 12 avec reconstruction	41
2.20	Coupe horizontale	42
2.21	(a) Fonction numérique représentant d'effet d'un FAS de taille 12 sans reconstruction, (b) Fonction numérique représentant d'effet d'un FAS de taille 12 avec reconstruction	42
2.22	(a) Ensemble binaire initial, (b) Granulométries en surfaces calculées avec et sans reconstruction	44
2.23	(a) Image numérique initiale, (b) Chapeau haut-de-forme noir de taille 30, (c) Image chapeau haut-de-forme seuillée	44
2.24	Caractéristiques du relief topographique et ligne de partage des eaux	46
2.25	Problème de marquage : sur-segmentation et fusion des fragments	46
2.26	(a) Image N°1, (b) Image N°2	48
2.27	Noyau du filtre Gaussien de taille 3×3	49
2.28	Image N°1 : (a) Filtrage gaussien de taille 3×3 itéré dix fois, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Maxima de l'image filtrée, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire	50
2.29	Image N°2 : (a) Résultat du filtrage gaussien de taille 3×3 itéré dix fois, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Minima du Gradient, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire	51

2.30 Image N°1 : (a) Résultat du filtrage médian de taille 3×3 itéré dix fois, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Minima du Gradient, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire	52
2.31 Image N°2 : (a) Résultat du filtrage médian de taille 3×3 itéré dix fois, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Minima du Gradient, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire	53
2.32 Image N°1 : (a) Résultat d'un filtrage alterné séquentiel de taille 14, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Minima du Gradient, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire	54
2.33 Image N°2 : (a) Résultat d'un filtrage alterné séquentiel de taille 14, (b) Gradient de l'image filtrée, (c) Minima du Gradient, (d) Image initiale, (e) Résultat de la segmentation par LPE, (f) Image binaire	55
2.34 (a) Image initiale, (b) Image seuillée après pré-filtrage	56
2.35 (a) Image initiale, (b) Image seuillée après pré-filtrage, (c) Fonction distance associée, (d) Marqueurs : maxima de la fonction distance	57
2.36 (a) Image initiale, (b) Image seuillée après pré-filtrage, (c) Fonction distance associée, (d) Marqueurs : maxima de la fonction distance	58
2.37 (a) Image initiale, (b) Image pré-filtrée : Sup du gradient et du chapeau haut-de-forme du FAS avec reconstruction de taille 10, (c) Coupe horizontale de l'image initiale, (d) Profil de la fonction de niveau de gris de l'image pré-filtrée	59
2.38 (a) Écrêtage de la fonction pré-filtrée, (b) Réduction des extrema : modification de la pente de la fonction distance	60
2.39 (a) Marqueurs de l'image pré-filtrée avant modification de la pente de sa fonction distance, (b) Marqueurs de l'image pré-filtrée après modification de la pente de sa fonction distance	60
2.40 Image 1 : (a) Image initiale, (b) Modification de la pente de la fonction distance ($\lambda = 2$ et $\mu = 2$), (c) Nouveaux marqueurs, (d) Gradient de l'image initiale, (e) Segmentation de l'image par LPE, (f) Image binaire	61
2.41 Image 2 : (a) Image initiale, (b) Modification de la pente de la fonction distance ($\lambda = 3$ et $\mu = 1$)	62
2.42 (a) Image initiale, (b) Modification de la pente de la fonction distance ($\lambda = 2$ et $\mu = 2$)	62
2.43 (a) Image initiale, (b) Modification de la pente de la fonction distance ($\lambda = 3$ et $\mu = 2$)	63
2.44 (a) Image initiale, (b) Modification de la pente de la fonction distance ($\lambda = 2$ et $\mu = 3$)	63
2.45 (a) Image initiale, (b) Sous-graphe correspondant au profil	69
2.46 Niveaux de gris relatifs des différentes structures de l'image de fragments de roches	70
2.47 (a) Image initiale pré-filtrée par FAS de taille 3 avec reconstruction (f), (b) Ouvert ultime (ouvertures isotropes de taille maximale 60) : $\nu(f)$	71

2.48	(a) Image initiale pré-filtrée (f), (b) Ouvert ultime $\nu(f)$, (c) Sous-graphes de l'image initiale et de son ouvert ultime	72
2.49	(a) Image initiale (f), (b) Ouvert ultime : $\nu(f)$, (c) Fonction granulométrique associée : $\xi(f)$	73
2.50	(a) Image binaire, (b) Boules maximales extraites superposées à l'image initiale .	73
2.51	“Niveau de gris relatif” des zones d'ombre plus grand que celui des fragments ($N_z > N_F$)	74
2.52	(a) Image initiale, (b) Boules maximales extraites de la fonction granulométriques pour le seuil $g = 30$, (c) Boules maximales après bouchage de trous (seule la boule située en bas à droite est conservée après ouverture de taille $g - 1 = 29$)	75
2.53	(a) Nouvelles boules maximales extraites superposées à l'image initiale, (b) Image binaire associée, (c) Image binaire des boules maximales précédentes	76
2.54	(a) Boules maximales avec des trous situés sur le bord (seuil $g = 32$), (b) Boules précédentes après bouchage de trous (perdues après ouverture de taille $g - 1 = 31$), (c) Boules maximales avec des trous situés sur le bord (seuil $g = 35$), (d) Boules précédentes après bouchage de trous (perdues après ouverture de taille $g - 1 = 34$)	76
2.55	(a) Fragment avec textures claires, (b) Image inverse, (c) Sous-graphe de l'image inverse montrant les textures claires sous forme de “trous” dans le relief	77
2.56	(a) Image initiale pré-filtrée (f), (b) Image initiale après pré-filtrage et bouchage de trous (f'), (c) Ouvert ultime associé $\nu(f')$, (d) Fonction granulométrique associée à $\nu(f')$, (e) Boules maximales extraites pour $\nu(f')$, (f) Boules maximales extraites pour $\nu(f)$	78
2.57	Superposition des boules maximales sur l'image initiale	79
2.58	(a) Image initiale pré-filtrée, (b) Profils des fonctions numériques	79
2.59	(a) Image initiale pré-filtrée (f), (b) Image initiale après pré-filtrage et bouchage de trous (f'), (c) Ouvert ultime associé $\nu(f')$, (d) Fonction granulométrique associée à $\nu(f')$, (e) Boules maximales extraites pour $\nu(f')$, (f) Superposition des boules maximales sur l'image initiale	80
2.60	(a) Image initiale pré-filtrée, (b) Profils des fonctions numériques	81
2.61	Séquence des traitements 2D suivie lors de cette étude	83
2.62	(a) Image initiale (f), (b) Image initiale après pré-filtrage et bouchage de trous (f'), (c) Ouvert ultime associé de taille 11 : $\nu_{11}(f')$, (d) $\chi_{11}(f')$, (e) Ouvert ultime associé à la taille 11 après ouverture de taille 10 : $\Upsilon_{11}(f')$, (f) Critère géométrique : $\gamma_6(\chi_{11}(f'))$ après application du critère géométrique, (g) Superposition (jaune) de (e) (éléments verts) et (f) (éléments rouges)	87
2.63	(a) Boules maximales de $\Upsilon_{11}(f')$ qui sont à l'origine des portions à reconstruire, (b) Portions à reconstruire qui correspondent aux boules de $\Upsilon_{11}(f')$ de taille 11, (c) Superposition de (a) (rouges) et (b) (jaunes), (d) Centres des boules maximales critiques de $\Upsilon_{11}(f')$, (e) Centres critiques pertinents (équivalents aux portions) (jaunes), (f) Portions reconstruites (dilatation de taille 11 des centres pertinents), (g) Boules maximales significatives : Regroupement des boules maximales de taille 11 de χ avec les portions reconstruites	88

2.64	(a) Boules reconstruites par dilatation géodésique, (b) Boules reconstruites à partir des boules maximales critiques, (c) Image initiale, (d) Superposition des boules extraites à partir des boules maximales critiques avec l'image initiale (la "fusion" des boules équivalentes aux trois fragments du centre de l'image a été évitée) . . .	89
2.65	(a) Superposition du résidu filtré (rouge) avec les portions à reconstruire (jaunes) (seuil $\tau = 15$), (b) Boules reconstruites après dilatation géodésique (jaunes), (c) Problème de "désaxage" : boules maximales extraites par géodésie (rouges) superposées à celles extraites par boules critiques maximales (jaunes) :	89
2.66	(a) Image initiale, (b) Boule maximale de taille 70 apparaissant sur χ_{70} (mais ne correspondant pas à un fragment)	90
2.67	(a) Images initiale, (b) Boules maximales pertinentes : boules significatives par rapport à tous les seuils, (c) Superposition des boules maximales pertinentes sur l'image initiale	90
2.68	(a) Image initiale, (b) Boules maximales pertinentes : boules significatives par rapport à tous les seuils, (c) Superposition des boules maximales pertinentes sur l'image initiale	91
2.69	(a) Image initiale, (b) Boules maximales pertinentes : boules significatives par rapport à tous les seuils, (c) Superposition des boules maximales pertinentes sur l'image initiale	92
2.70	(a) Image initiale, (b) Superposition des boules maximales pertinentes sur l'image initiale	92
2.71	(a) Image initiale, (b) Boules maximales pertinentes : boules significatives par rapport à tous les seuils, (c) Superposition des boules maximales pertinentes sur l'image initiale	93
2.72	(a) Images initiale, (b) Image pré-filtrée, (c) Marqueurs : boules maximales pertinentes extraites par contrôle des Sup des résidus, (d) Supremum du gradient de l'image pré-filtrée et de son chapeau haut-de-forme noir de taille 5	96
2.73	(a) Segmentation de l'image par LPE contrôlée, (b) Image binaire équivalente . . .	96
2.74	(a) Image initiale, (b) Segmentation de l'image par LPE contrôlée	97
2.75	(a) Image initiale, (b) Segmentation de l'image par LPE contrôlée	97
2.76	(a) Image initiale, (b) Segmentation de l'image par LPE contrôlée	97
2.77	(a) Sous-graphe illustrant une image de fragments de roches correctement contrastée, (b) Sous-graphe illustrant une image de fragments de roches contrastés de manière irrégulière	99
2.78	Histogramme de niveaux de gris d'une image de roches présentant deux modes .	100
2.79	(a) Images initiale, (b) Image pré-filtrée par FAS et bouchage de trous, (c) Histogramme de l'image pré-filtrée et valeur de mise à zéro $\alpha = 58$, (d) Mise à zéro des zones d'ombres de l'image pré-filtrée (multipliée), (e) Fonction granulométrique associée, (f) Gradient de la fonction granulométrique, (g) Boules maximales extraites de la fonction granulométrique, (h) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (i) LPE, (j) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre par seuillage de l'image pré-filtrée	101

2.80	(a) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (b) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre	102
2.81	(a) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (b) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre	102
2.82	(a) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (b) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre	103
2.83	(a) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (b) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre	103
2.84	(a) Superposition de la LPE sur l'image initiale, (b) Image binaire équivalente avec prise en compte des zones d'ombre	104
3.1	Tailles mises en jeu par le logiciel SPLIT	108
3.2	Ouverture de taille $\mu = 30$ opérée sur l'image binaire (les zones blanches correspondent à la surface passante	111
4.1	Refus massiques de l'ensemble des images du lot N°1	114
4.2	Courbes granulométriques de l'ensemble des images du lot N°1	115
4.3	Refus massiques du lot N°2	116
4.4	Courbe granulométrique du lot N°2	116
4.5	Refus massiques pour les classes individuelles du lot N°3	117
4.6	Refus massiques du lot N°4	117
4.7	Courbe granulométrique du lot N°4	118
4.8	Difficulté d'accès à la taille tamisage pour une surface du fragment	120
4.9	Critère de tri des surfaces adopté	120
4.10	Passage au 3D par anamorphose : premier cas de figure	122
4.11	Passage au 3D par anamorphose : deuxième cas de figure	122
4.12	Passage par anamorphose : problème de différence d'étalement	123
4.13	Passants cumulés surfaciques des images du lot N°1	124
4.14	Anamorphoses relatives aux images du lot N°1	125
4.15	Granulométries volumiques issues de l'anamorphose utilisant les facteurs de $P10$	125
4.16	Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs de $P10$	126
4.17	Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs de $P10$	126
4.18	Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs de $P10$	127
4.19	Passants cumulés en volumes des deux tas	128
4.20	Passants cumulés en surfaces des deux tas	128
4.21	Anamorphoses relatives aux deux tas du lot N°1	129

4.22	Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs du Tas N°1	130
4.23	Anamorphoses relatives aux deux tas N°1 et à l'image P10	130
4.24	Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs de P10	131
4.25	Passants cumulés surfaciques et volumiques du tas unique (Lot N°1)	132
4.26	Anamorphoses relatives au tas unique et à l'image P10	132
4.27	Résultats de l'anamorphose utilisant les facteurs de P10	133
4.28	Passants cumulés surfaciques et volumiques du lot N°2	135
4.29	Refus surfaciques et refus volumiques	136
4.30	Redistribution des classes analyse d'images	138
4.31	Calcul des épaisseurs	139
4.32	Distribution des surfaces en fonction des tailles à l'intérieur d'une classe donnée .	140
4.33	Refus surfaciques et volumiques des différentes classes individuelles du lot N°3 . .	141
4.34	Fonction φ (lot N°3)	141
4.35	Redistribution des classes analyse d'images (lot N°3)	142
4.36	Loi des tailles du lot N°3	142
4.37	Refus surfaciques ajustés et refus volumiques du lot N°3	143
4.38	Loi des épaisseurs du lot N°3	144
4.39	Refus surfaciques calculés par analyse d'images du lot N°4	145
4.40	Refus surfaciques et volumiques calculés par analyse d'images (lot N°4)	146
4.41	Schéma de regroupement des refus volumiques	146
4.42	Regroupement des refus volumiques calculés par analyse d'images suivant les classes de tailles tamisage (lot N°4)	147
4.43	Refus volumiques relatifs aux deux techniques de mesure (lot N°4)	147
4.44	Proportions volumiques expérimentales relatives aux deux techniques de mesure (lot N°4)	148
4.45	Paramètres d'ajustement des proportions volumiques du lot N°4	149
5.1	(a) Image initiale de fragments qui se chevauchent avec présence de ségrégation, (b) Partition binaire où les zones noires correspondent au groupement et à la ségrégation des fragments	156
5.2	Couche supérieure de fragments	160
5.3	Résultats de la segmentation : réalisation aléatoire du modèle (ensemble A) . . .	160
5.4	$P^*(K, t)$	161
5.5	Ligne de partage des eaux	161
5.6	complémentaire de l'ensemble A	161

5.7	$Q^*(K, t)$	162
5.8	Estimation de la surface de l'érodé	162
5.9	Estimation du périmètre de l'érodé	162
5.10	Estimation de la surface de l'ouvert déduit de la partition	163
5.11	Passants cumulés surfaciques	163
5.12	Problème de convexité des grains pour la formule de Steiner	163
5.13	Couche supérieure des fragments (test N°2)	164
5.14	Deuxième réalisation du modèle	164
5.15	Estimation de la surface de l'érodé	165
5.16	Estimation du périmètre de l'érodé	165
5.17	Estimation de la surface de l'ouvert déduit de la partition	165
5.18	Passants cumulés surfaciques	165
5.19	Ombres portées à mettre en valeur	168
5.20	Incidence variable d'éclairement pour la même image	169
5.21	Dispositif expérimental d'éclairement avec incidence variable	169
5.22	(a) Incidence équivalente à la hauteur 24 cm, (b) Incidence équivalente à la hauteur 36 cm, (c) Incidence équivalente à la hauteur 48 cm	170
5.23	(a) Incidence équivalente à la hauteur 60 cm, (b) Incidence équivalente à la hauteur 72 cm	170
5.24	(a) Supremum des différentes incidences, (b) Infimum des différentes incidences	170
5.25	Ombre portée située sur le fragment et qui touche le contour	171
5.26	(a) Image Inf filtrée par <i>FAS</i> de taille 10 suivi d'un bouchage de trous, (b) Image Sup filtrée par <i>FAS</i> de taille 10 suivi d'un bouchage de trous	172
5.27	Niveaux de gris des deux images Inf filtrée (bleue) et Sup filtrée (rouge)	172
5.28	Différence entre les images Sup et Inf filtrées	173
5.29	Ombres portées par seuillage	173
5.30	(a) Image Inf, (b) Superposition des ombres portées extraites par le critère de séparation retenu, (c) Partition binaire obtenue par segmentation de l'image Sup, (d) Grains intacts extraits (gris foncé)	174
5.31	Histogrammes équivalents aux différentes distributions	175
5.32	(a) Graines, (b) Résultats de la segmentation la segmentation, (c) ciment, (d) Résultats de la segmentation	179
5.33	(a) Image P01, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P09, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P10, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P14, (h) Résultat de la segmentation	200

5.34	(a) Image P29, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P46, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P49, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P67, (h) Résultat de la segmentation	201
5.35	(a) Image P1, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P2, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P3, (f) Résultat de la segmentation	204
5.36	(a) Image P4, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P5, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P6, (f) Résultat de la segmentation	205
5.37	(a) Image P7, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P8, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P9, (f) Résultat de la segmentation	206
5.38	(a) Image P1, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P2, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P3, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P4, (h) Résultat de la segmentation, (i) Image P5, (j) Résultat de la segmentation	209
5.39	(a) Image P6, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P7, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P8, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P9, (h) Résultat de la segmentation, (i) Image P10, (j) Résultat de la segmentation . . .	210
5.40	(a) Image P11, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P12, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P13, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P14, (h) Résultat de la segmentation, (i) Image P15, (j) Résultat de la segmentation .	211
5.41	(a) Image P1, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P2, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P3, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P4, (h) Résultat de la segmentation	214
5.42	(a) Image P5, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P6, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P7, (f) Résultat de la segmentation	215

Liste des tableaux

2.1	Noyau de taille 3x3	38
4.1	Refus massiques des quatre lots d'images	119
4.2	Paramètres surfaciques et paramètres d'anamorphose du lot N°1	124
4.3	Données relatives aux deux tas du lot N°1	129
4.4	Données relatives au tas unique du lot N°1	132
4.5	Paramètres du modèle de Rosin-Rammler du lot N°2	134
5.1	Refus surfaciques équivalents aux images du lot $N^{\circ}1$	203
5.2	Refus surfaciques équivalents aux images du lot $N^{\circ}2$	207
5.3	Refus surfaciques et nombre de fragments du lot $N^{\circ}3$	212
5.4	Refus surfaciques équivalents aux images du lot $N^{\circ}4$	217

Références bibliographiques

- [1] T. ALLEN. *Particle Size Measurement*. Chapman and Hall, London, 1981.
- [2] A. BEDAIR, L.K. DANESHMEND, and C.F.B. HENDRICKS. Comparing performance of a novel automated technique for identification of muck pile fragment boundaries. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 157–166, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [3] S. BEUCHER. *Segmentation d'Images et Morphologie Mathématique*. PhD thesis, École des Mines de Paris, 1990.
- [4] S. BEUCHER. Transformations résiduelles en morphologie numérique. *Rapport interne, CMM-Ecole des Mines de Paris*, 2003.
- [5] S. BEUCHER and C. LANTUÉJOUL. Use of watersheds in contour detection. *Proc. Int. Workshop on image processing, real-time edge and motion detection-estimation*, pages 17–21, 1979.
- [6] S. BEUCHER and F. MEYER. The Morphological Approach to Segmentation : The Watershed Transformation. *Mathematical Morphology and Image Processing. E Dougherty Ed., Marcel-Dekker, New York*, pages 433–481, 1992.
- [7] R. CHAVEZ. *Amélioration du tir à l'explosif à l'aide de l'analyse d'images*. Diplôme des études approfondies. École des Mines de Paris. Institut national polytechnique, 1991.
- [8] R. CHAVEZ. *Mise au point d'outils pour le contrôle du tir à l'explosif sous contraintes de production*. PhD thesis, École des Mines de Paris, 1996.
- [9] R. CHAVEZ, N. CHEIMANOFF, and J. SCHLEIFER. Sampling problems during grain-size distribution measurements. *Rock Fragmentation by Blasting. Proceedings du Congrès Fragblast 5*, 1996.
- [10] M. COSTER and J.L. CHERMANT. *Précis d'Analyse d'Images*. Presses du CNRS, 1989.
- [11] C.V.B. CUNNINGHAM. Fragmentation estimations and the kuz-ram model – four years on. *2nd Int. Symp. on Rock Frag. by Blasting, Keystone, Colorado*, pages 475–487, 1987.
- [12] C.V.B. CUNNINGHAM. The Kuz-Ram fragmentation model - 20 years on. *Brighton Conference Proceedings, R. Holmberg et al. European Federation of Explosives Engineers*, 2005.
- [13] S. DAHLHIELM. Industrial applications of image analysis - The IPACS system. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 59–65, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [14] D.C. DOWNS and B.E. KETTUNEN. On-line fragmentation measurement utilizing the CIAS^(R) system. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 79–82, Balkema, Rotterdam, 1996.

- [15] J. FRANKLIN and T. KATSABANIS. *Measurement of Blast Fragmentation*. Presses du CNRS, 1989.
- [16] J.A. FRANKLIN. Fragment size measurements and statistics. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 23–31, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [17] J.A. FRANKLIN, J.M. KEMENY, and K.K. GIRDNER. Evolution of measuring systems : A review. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 47–52, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [18] K.K. GIRDNER, J.M. KEMENY, A. SRIKANT, and R. MCGILL. The split system for analysing the size distribution of fragmented rock. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 101–108, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [19] P. GY. *L'échantillonnage des minerais en vrac : théorie générale, erreurs opératoires, compléments. 2*. Paris : Bureau de recherches géologiques et minières, 1971.
- [20] P. GY. *Théorie et pratique de l'échantillonnage des matières morcelées*. Cannes : ED.PG, 1975.
- [21] P. GY and G. MATHERON. *L'échantillonnage des minerais en vrac : théorie générale. 1*. Paris : Bureau de recherches géologiques et minières, 1967.
- [22] T. HAVERMANN and W. VOGT. TUCIPS - A system for the estimation of fragmentation after production blasts. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 67–71, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [23] H. HEYWOOD. The scope of particle size analysis and standardization. *Inst. Chem. Engr. Symp on Particle Size Analysis (UK)*, 1947.
- [24] G.C. HUNTER, C. McDERMOTT, N.J. MILES, A. SINGH, and M.J. SCOBLE. A review of image analysis techniques for measuring blast fragmentation. *Mining Science and Technology, Vol. 11, No. 1*, pages 19–36, 1990.
- [25] D. JEULIN. Morphological modeling of images by sequential random functions. *Signal Processing 16*, pages 403–401, 1988.
- [26] D. JEULIN. *Modèles morphologiques de structures aléatoires et de changement d'échelle*. PhD thesis, Université de CAEN, 1991.
- [27] D. JEULIN. Random models for morphological analysis of powders. *Journal of Microscopy. Vol. 172*, pages 13–21, 1993.
- [28] D. JEULIN. Random models for the morphological analysis of powders. *J Microsc 172 (1)*, pages 13–21, 1993.
- [29] D. JEULIN. *Models of Random Structures - Lecture notes, CT-02/02/MM*. Écoles des Mines de Paris. Enseignement spécialisé MP8-S1634, March 2003.
- [30] J. KEMENY, K. GIRDNER, T. BOBO, and B. NORTON. Improvements for fragmentation measurement by digital imaging : Accurate estimation of fines. *Sixth international symposium for rock fragmentation by blasting*, pages 103–109, 1999.
- [31] S.K. KENNEDY and J. MAZZULLO. Image analysis method of grain size measurement, principles, methods and application of particle size analysis. *Syvitski, J.P.M (ed), Cambridge University Press, New York*, pages 76–87, 1991.
- [32] T.H. KLEINE and A.R. CAMERON. Blast fragmentation measurement using GoldSize. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 83–89, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [33] V.M. KUZNETSOV. The mean diameter of fragments formed by blasting rock. *Soviet Mining Science, 9(2)*, pages 144–148, 1973.

- [34] C. LANTUÉJOUL and H. DIGABEL. Iterative algorithms. *Proc. of 2nd European Symposium on Quantitative Analysis of Microstructures in Material Sciences, Biology and Medicine*, pages 39–49, 1977.
- [35] Q. LIU and H. TRAN. Comparing systems - validation of fragscan, wipfrag and split. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 151–155, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [36] J. LOEBLLTD. *IMAGES ANALYSIS : Principle and Practice*. Published by Joyce LoebLLtd, UK, 1989.
- [37] J. ANGULO LÓPEZ. *Morphologie mathématique et indexation d'images couleur. Application à la microscopie en biomédecine*. PhD thesis, École des Mines de Paris, 2003.
- [38] N.H. MAERZ. Reconstructing 3-d block size distribution from 2-d measurements. *Measurement of Blast Fragmentation*, pages 39–43, 1996.
- [39] N.H. MAERZ, J.A. FRANKLIN, L. ROTHERBURG, and D.L. COURSEN. Measurement of rock fragmentation by digital photoanalysis. *5th Int. Cong. Int. Soc. Rock Mech, 1*, pages 687–692, 1987.
- [40] N.H. MAERZ, T.C. PALANGIO, and J.A. FRANKLIN. Wipfrag image based granulometry system. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 91–99, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [41] N.H. MAERZ and W. ZHOU. Optical digital fragmentation measuring systems - inherent sources of error. *FRAGBLAST, The International Journal For Blasting and Fragmentation. Vol. 2, No. 4,*, pages 415–431, 1998.
- [42] N.H. MAERZ and W. ZHOU. Calibration of optical digital fragmentation measuring systems. *Fragblast 1999. Johannesburg, South African Institute of Mining and Metallurgy*, pages 125–131, 1999.
- [43] B. MARCOTEGUI. *Segmentation de sequences d'images en vue du codage*. PhD thesis, École des Mines de Paris, 1996.
- [44] G. MATHERON. *Éléments pour une théorie des milieux poreux*. Masson, Paris, 1967.
- [45] F. MEYER. Contrast features extraction. *Quantitative Analysis of Microstructures in Materials Science, Biology and Medicine, Chermant, J.L.Ed.*, pages 374–380, 1977.
- [46] F. MEYER. *Cytologie quantitative et morphologie mathématique*. PhD thesis, École des Mines de Paris, 1979.
- [47] F. MEYER. Un algorithme optimal de ligne de partage des eaux. *Proceedings 8ème Congrès AFCET, Lyon-Villeurbanne, France*, pages 447–457, 1991.
- [48] F. MEYER and S. BEUCHER. Morphological segmentation. *Journal of Visual Communication and Image Representation, 1(1)*, pages 21–45, 1990.
- [49] C.H MURPHY. *Handbook of particle sampling and analysis methods*. Verlag Chemie International, 1984.
- [50] T.J. NAPIER-MUNN, S. MORRELL, R.D. MORRISON, and T. KOJOVIC. Mineral comminution circuits : Their operation and optimization. *Julius Kruttschnitt Mineral Research Center, Indooroopilly. Australia*, 1996.
- [51] D. NOURRY. *Utilisation de réseaux de neurones pour examiner la fragmentation des roches à l'explosif et établir son influence sur la rentabilité de l'exploitation dans les carrières*. PhD thesis, École des Mines de Paris, 2002.
- [52] L. NYBERG, O. CARLSON, and B. SCHMIDTBAUER. Estimation of the size distribution of fragmented rock in ore mining through automatic image processing. *Proc. IMEKO 9th World Congress*, pages 293–301, May 1982.

- [53] The South African Institute of Mining and Metallurgy. Symposium Series S21. *Sixth International Symposium for Rock Fragmentation by Blasting*. Camera Press, 8-12 August 1999.
- [54] F. OUCHTERLONY. What does the fragment size distribution of blasted rock look like ?. *Brighton Conference Proceedings, R. Holmberg et al. European Federation of Explosives Engineers*, 2005.
- [55] F. OUCHTERLONY, B. NIKLASSON, and S. ABRAHAMSSON. Fragmentation monitoring of production blasts at mrica. *Proc. 3rd. International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Australia, IMM, Brisbane*, 1990.
- [56] T.C PALANGIO. WipFrag - A new tool for blast evaluation. *Proc 11th Ann. ISEE Symposium on Balsting research, Nashville, Tennessee, International Society. Explosives Engrs. Vol. 1*, pages 269–285, 1985.
- [57] T.C PALANGIO, J.A. FRANKLIN, and N.H. MAERZ. WipFrag - A breakthrough in fragmentation measurement. *Proc 6th High-tech seminar on state of the art blasting technologie, instrumentation, and explosives. Boston, Mass.*, pages 943–971, 1995.
- [58] J.K. PATEL, C.H. KAPADIA, and D.B. OWEN. Handbook of statistical distributions. *Marcel Dekker, New York*, 1976.
- [59] M. PELEG. Determination of the parameters of the Rosin-Rammler and beta distributions from their mode and variance using equation-solving software. *Powder technology*, pages 181–184, 1996.
- [60] S.A. RHOLL and S.G. GRANNES and M.S. STAGG. Photographic assessment of the fragmentation of rock quarry muckpiles. *4th International symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, pages 501–505, 1993.
- [61] L. A. SANTALO. *Integral geometry and geometric probability*. Addison-Westley, 1976.
- [62] J.C SANTAMARINA, M. MORLEY, J.A. FRANKLIN, and D.S. WANG. Development and testing of a zooming technique for fragmentation. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 133–139, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [63] J. SCHLEIFER. Granulométrie en ligne par analyse d'images. *Les techniques de l'industrie minière*, pages 54–60, 2001.
- [64] J. SCHLEIFER and B. TESSIER. FRAGSCAN : A tool to measure fragmentation of blasted rock. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 73–78, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [65] J. SCHLEIFER and B. TESSIER. Fragmentation Assessment Using the FragScan system : Quality of a Blast. *Hunter Valley, NSW*, pages 28–31, October 2001.
- [66] J. SCHLEIFER, B. TESSIER, and T. SRHIAR. What type of difficulties are to be expected in order to 'benchmark' fragmentation assessment systems. *Sixth international symposium for rock fragmentation by blasting*, pages 121–124, 1999.
- [67] A. SCOTT, A. COCKER, N. DJORDJEVIC, M. HIGGINS, D. LA ROSA, K.S. SARMA, and R. WEDMAIER. *Open Pit Blast Design Analysis and Optimization*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Center, Indooroopilly. Australia, 1996.
- [68] J. SERRA. *Image Analysis and Mathematical Morphology*, volume I. Academic Press, London, 1982.
- [69] J. SERRA. *Image Analysis and Mathematical Morphology : theoretical Advances*, volume II. Academic Press, London, 1988.
- [70] J. SERRA and L. VINCENT. *Morphological Filtering*. Rapport technique, CMM-Ecole des mines de Paris, C-05/89/MM, juin 1989.

- [71] M.R. SMITH and L. COLLIS. *Aggregates*, volume The Geological Society. London, 1993.
- [72] T. SRHIAR. *Étude et amélioration du processus de mesure de la granularité par analyse d'images : Réalisation d'un bans d'essais*. PhD thesis, École des Mines de Paris, 1999.
- [73] J.D STOCKHAM. What is particle size : the relationship among statistical diameters. *Particle size analysis*, eds, pages 1–12, 1977.
- [74] J.D STOCKHAM and E.G. FOCHTMAN. *Particle size analysis*, volume I. Iit Research Institute Fine Particles Research Section, 1977.
- [75] C. VACHIER. *Extraction de caractéristiques, segmentation d'image et morphologie mathématique*. PhD thesis, École des Mines de Paris, 1995.
- [76] L. VINCENT. Morphological algorithms. *Mathematical Morphology in Image Processing. Dougherty*, Marcel-Dekker, New York, pages 225–288, 1992.
- [77] W.X. WANG, F. BERGHOLM, and O. STEPHANSSON. Image analysis of fragment size and shape. *Rock Fragmentation by blasting, Mohanty (ed)*, pages 233–243, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [78] W.X. WANG and O. STEPHANSSON. Comparison between sieving and image analysis of aggregates. *Measurement of Blast Fragmentation, Franklin and Katsabanis (eds)*, pages 141–149, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [79] Y.K YEN, C.L. LIN, and J.D. MILLER. The overlap problem in on-line coarse particle size measurement - segmentation and transformation. 1994.

Annexes

1. Traitements 2D relatifs aux lots utilisés dans la méthode de l'anamorphose

1.1. Lot d'images N°1

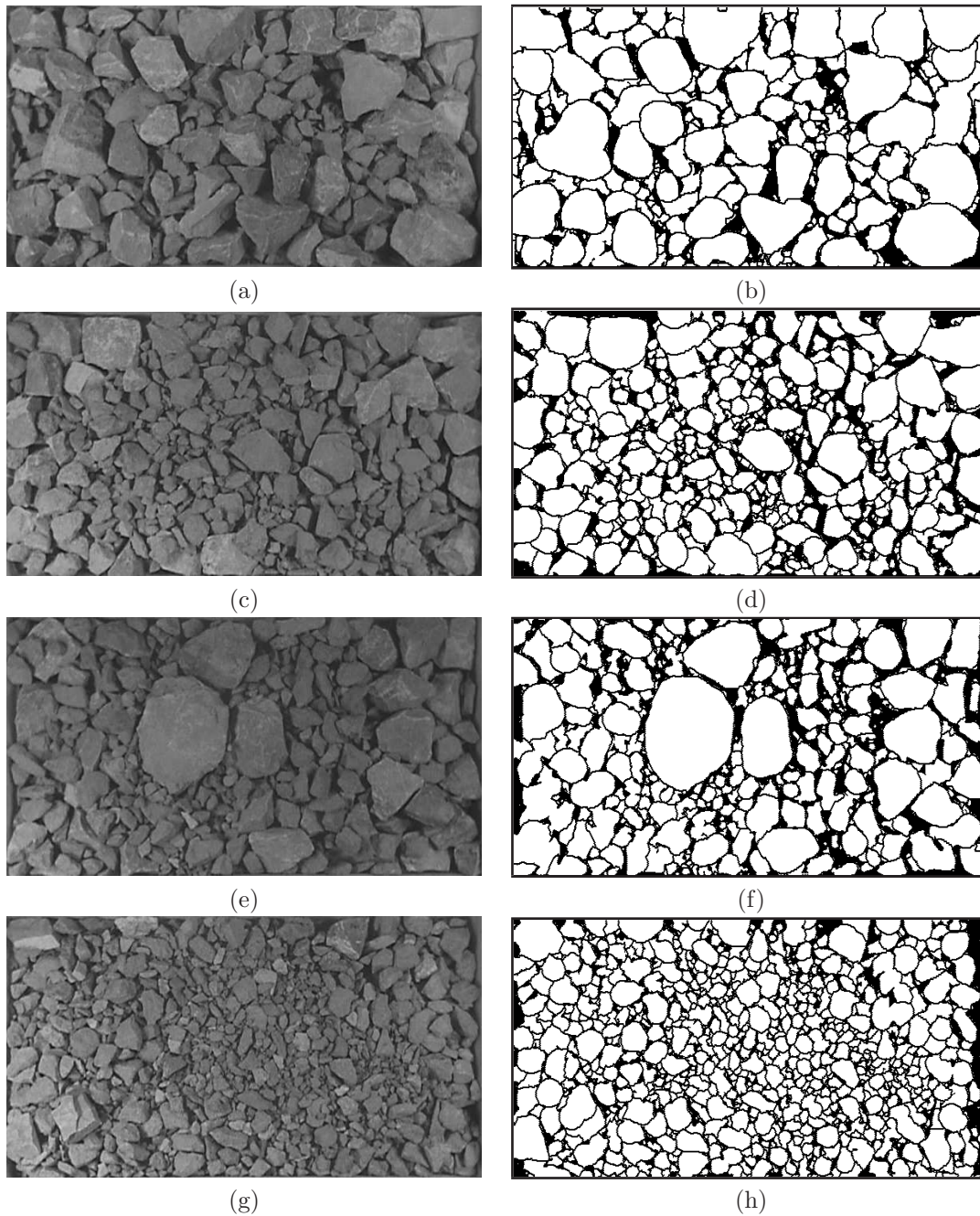


Fig. 5.33: (a) Image P01, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P09, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P10, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P14, (h) Résultat de la segmentation

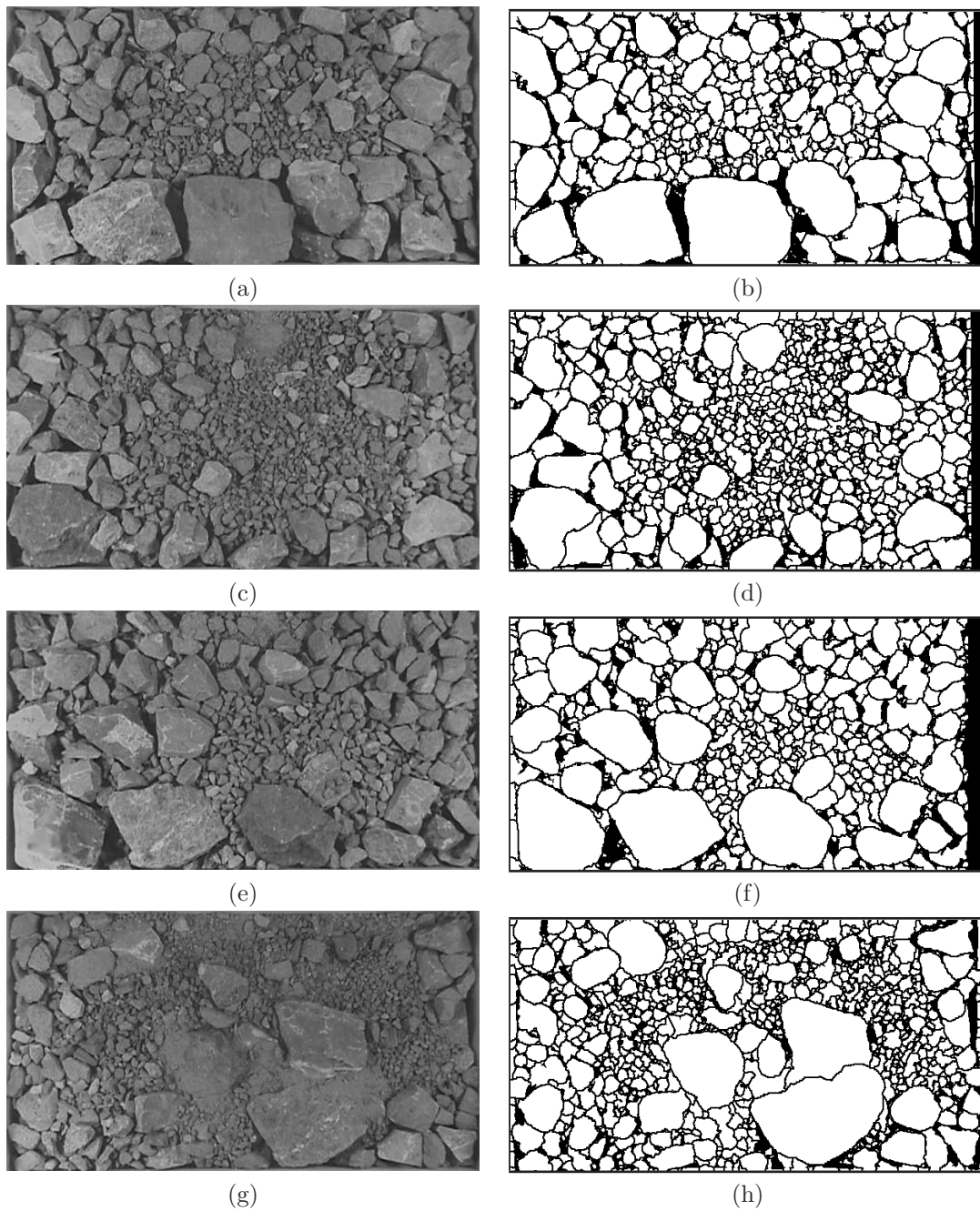


Fig. 5.34: (a) Image P29, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P46, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P49, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P67, (h) Résultat de la segmentation

11,54	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12,04	0	0	0	0	0	0	0	165,53	0
12,29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12,53	0	0	0	0	176,49	0	0	0	0
12,78	0	0	0	0	0	0	0	0	220,15
13,03	0	0	187,66	0	0	0	0	0	0
13,28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13,53	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13,78	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,52	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,77	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,26	0	0	0	0	207,59	0	0	0	0

TAB. 5.1: Refus surfaciques équivalents
aux images du lot $N^{\circ}1$

1.2. Lot d'images N°2

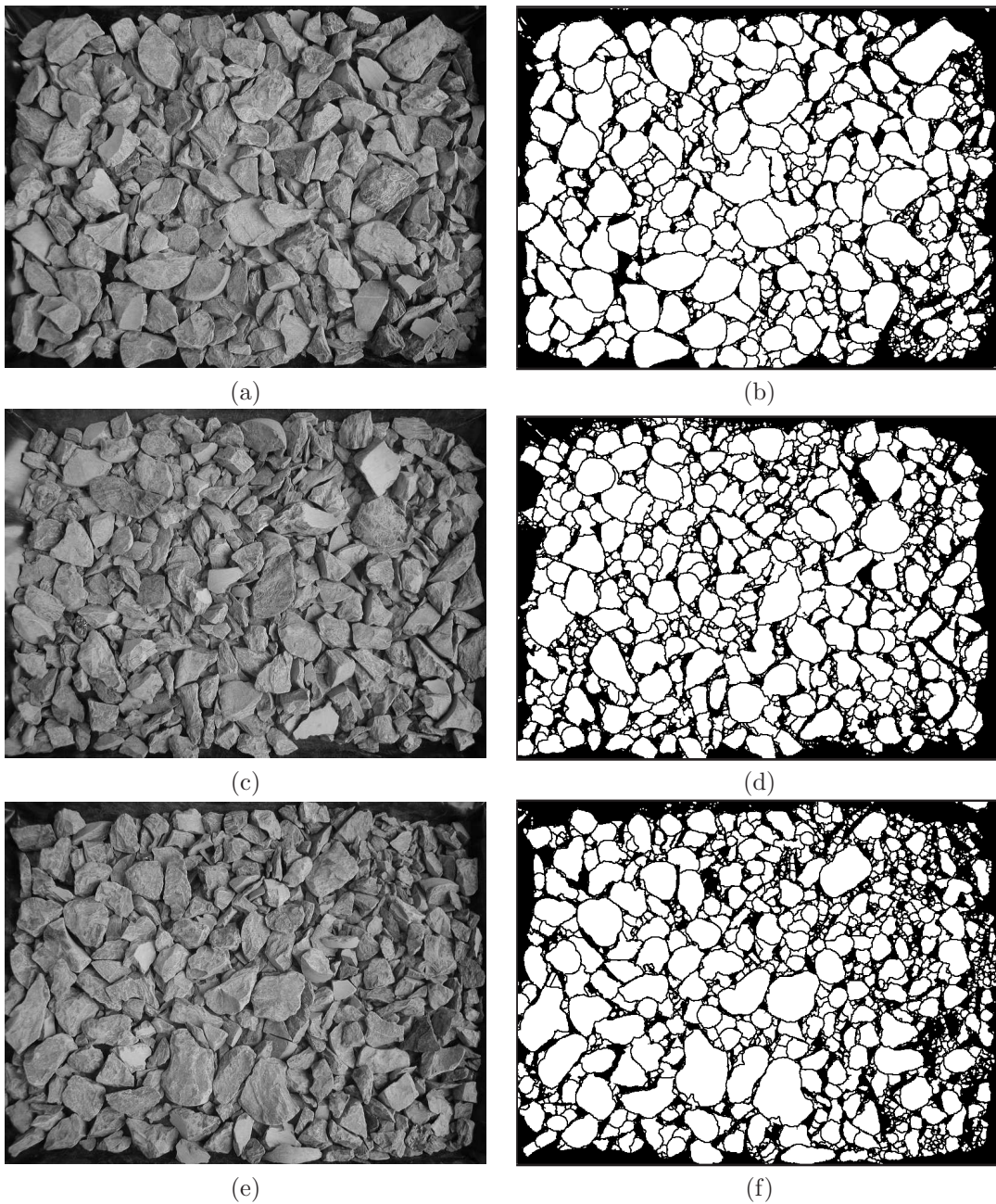


Fig. 5.35: (a) Image P1, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P2, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P3, (f) Résultat de la segmentation

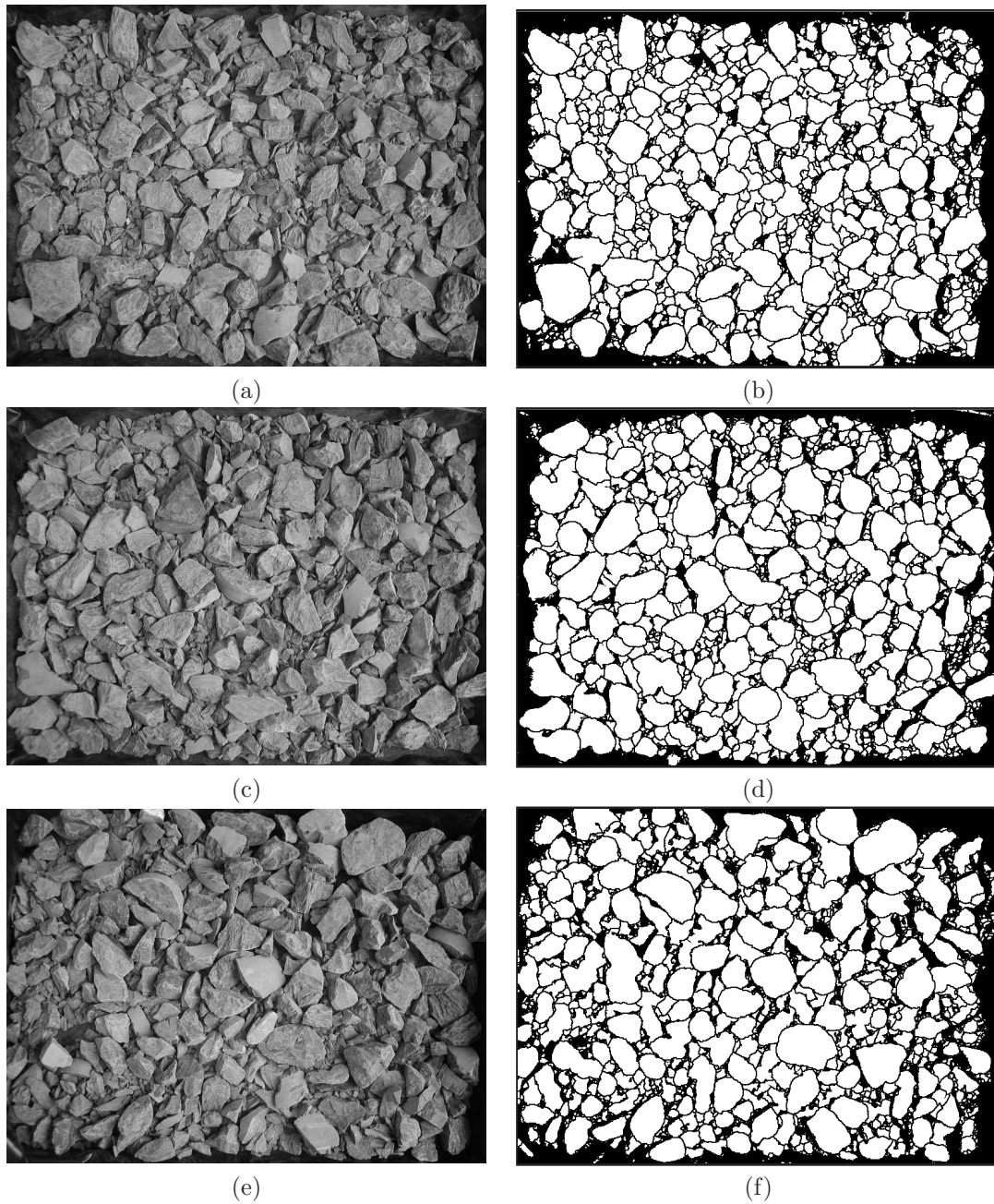


Fig. 5.36: (a) Image P4, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P5, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P6, (f) Résultat de la segmentation

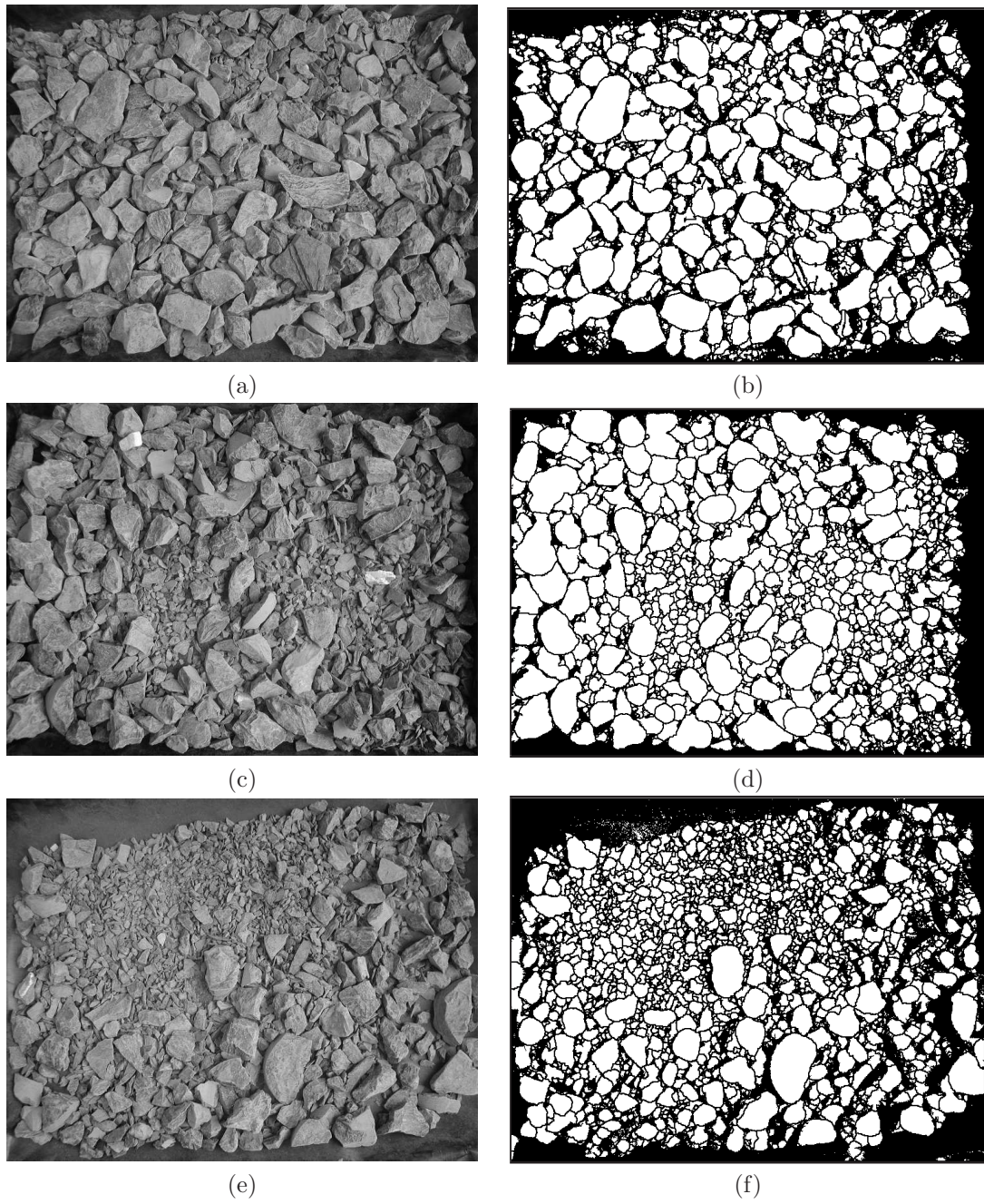


Fig. 5.37: (a) Image P7, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P8, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P9, (f) Résultat de la segmentation

Lot N°2 (Neuf images)									
Image	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Taille [mm]	Refus [cm^2]								
1,1	685,72	828,32	1106,94	928,15	733,34	878,91	1194,39	1120,13	1794,68
1,84	691,1	727,69	1115,28	822,81	742,09	624,64	917,79	1292,2	1929,48
2,57	842,99	1007,52	1302,42	1228,97	1235,15	906,35	1195,33	1443,01	2460,35
3,3	709,8	862,63	1264,75	1261,93	1034,03	870,43	948,87	1451,35	1962,31
4,04	1051,25	1415,29	1339,42	1895,44	1227,22	1119,59	1220,35	2094,02	2265,14
4,77	844,87	1199,1	1320,45	1321,26	1144,07	1046,27	1000,39	1661,09	1911,86
5,51	1592,21	2161,96	1423,9	1927,19	1623,01	1344,93	1343,86	1754,99	2060,79
6,24	1346,82	1294,08	1570,41	1607,41	1173	1236,1	1253,99	1519,83	1151,88
6,98	1279,82	1450,68	1910,78	2121,06	1136,94	1436,69	1056,09	2101,55	1716,92
7,71	1384,22	2184,96	1921,28	1338,21	1390,67	1676,42	1461,04	1811,09	1335,78
8,44	895,59	1664,05	1108,42	802,09	1673,6	1549,56	1863,83	1925,04	362,84
9,18	1486,87	1371,97	1538,8	1653,02	1613,87	2577,93	1650,19	1788,63	1248,47
9,91	2483,49	1796,83	1764,54	1180,53	1320,18	705,76	2769,51	1666,2	711,55
10,65	1818,22	1871,9	3017,32	1931,5	1721,09	3137,06	2467,75	1355,96	743,43
11,38	1300	2053,52	1372,92	2670,49	2231,11	2358,78	2044,24	1623,01	1029,99
12,12	1650,32	2151,33	1301,48	1398,21	3069,25	2561,66	2392,68	1796,43	260,19
12,85	1291,93	2785,79	1651,67	1535,97	2228,15	2199,09	624,51	756,75	1071,16
13,59	2883,59	1053	1450,54	2962,7	1353,68	2189,54	1545,93	2017,2	784,47
14,32	821,33	1486,6	1533,55	2312,5	1219,01	1719,61	2034,28	1009,68	524,68
15,05	2281,29	1442,74	2528,43	1684,63	1969,44	1406,68	1964,33	1276,72	241,62
15,79	2196,8	291,8	1191,3	2564,08	3602	1391,48	325,84	2461,43	0
16,52	373,47	293,01	0	1439,64	783,39	781,37	650,2	400,24	0
17,26	1634,45	1406,55	1503,14	1303,5	883,89	1525,21	629,62	1839,48	448,4
17,99	1146,63	784,2	0	750,83	2864,36	347,1	976,31	327,19	364,99
18,73	1265,96	527,1	384,77	520,65	2015,85	920,08	916,17	487,95	0
19,46	1036,99	439,39	441,27	492,66	0	652,22	1155,51	2218,33	0
20,19	930,84	1948,99	722,85	917,39	594,24	0	0	0	0
20,93	1804,23	598,94	625,04	0	444,9	665,4	0	422,17	0
21,66	2548,2	0	0	0	1113,94	1557,23	0	0	729,58
22,4	1231,25	0	0	0	0	0	0	639,98	0
23,13	1663,37	622,76	592,49	0	609,84	0	0	0	0
23,87	0	0	0	0	0	1628,66	885,1	0	0
24,6	0	0	0	0	0	0	681,68	0	0
25,33	0	0	968,91	0	0	0	0	0	0
26,07	0	0	1709,52	0	0	0	0	0	0
26,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27,54	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29,01	0	0	0	923,04	0	0	0	0	0
29,74	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. 5.2: Refus surfaciques équivalents
aux images du lot N°2

2. Traitements $2D$ relatifs aux lots utilisés dans la méthode des histogrammes

2.1. Lot d'images N°3

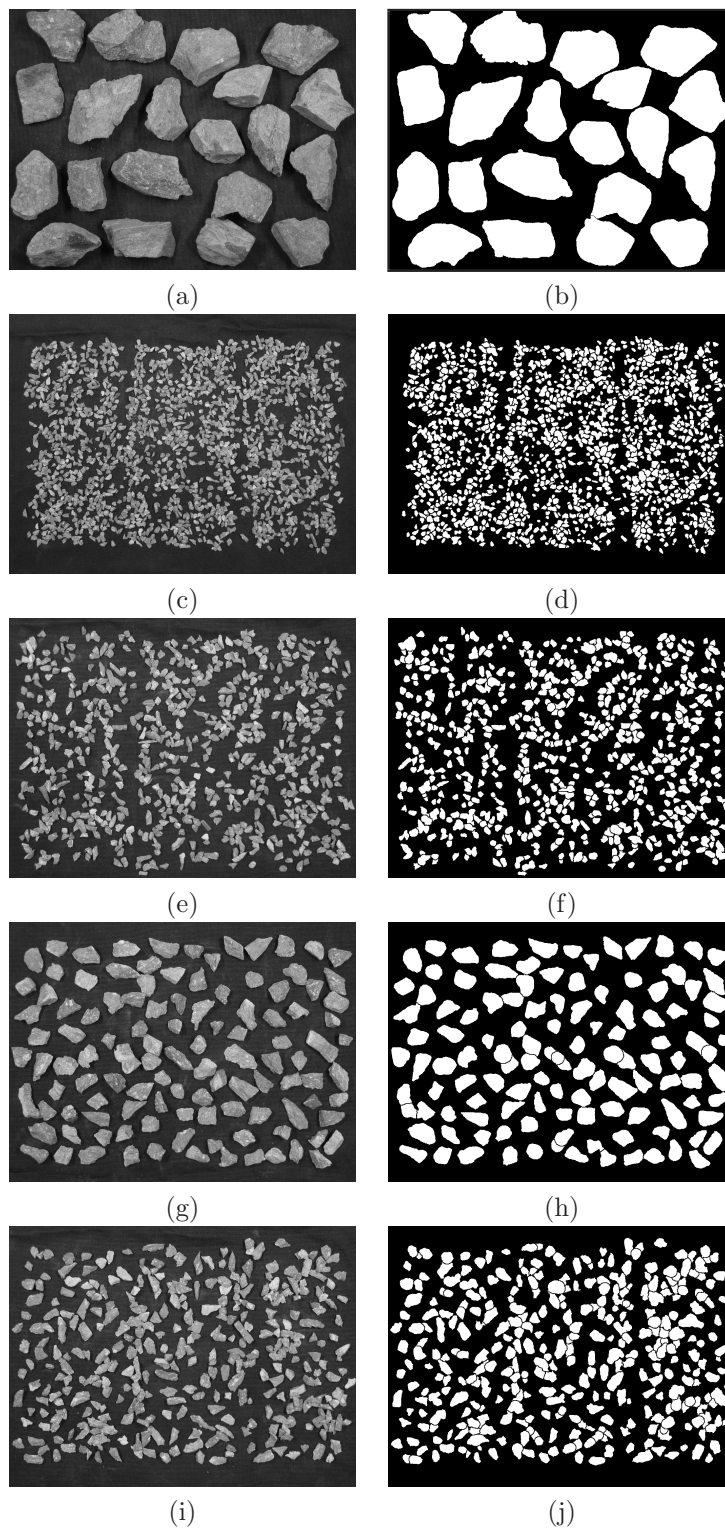


Fig. 5.38: (a) Image P1, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P2, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P3, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P4, (h) Résultat de la segmentation, (i) Image P5, (j) Résultat de la segmentation

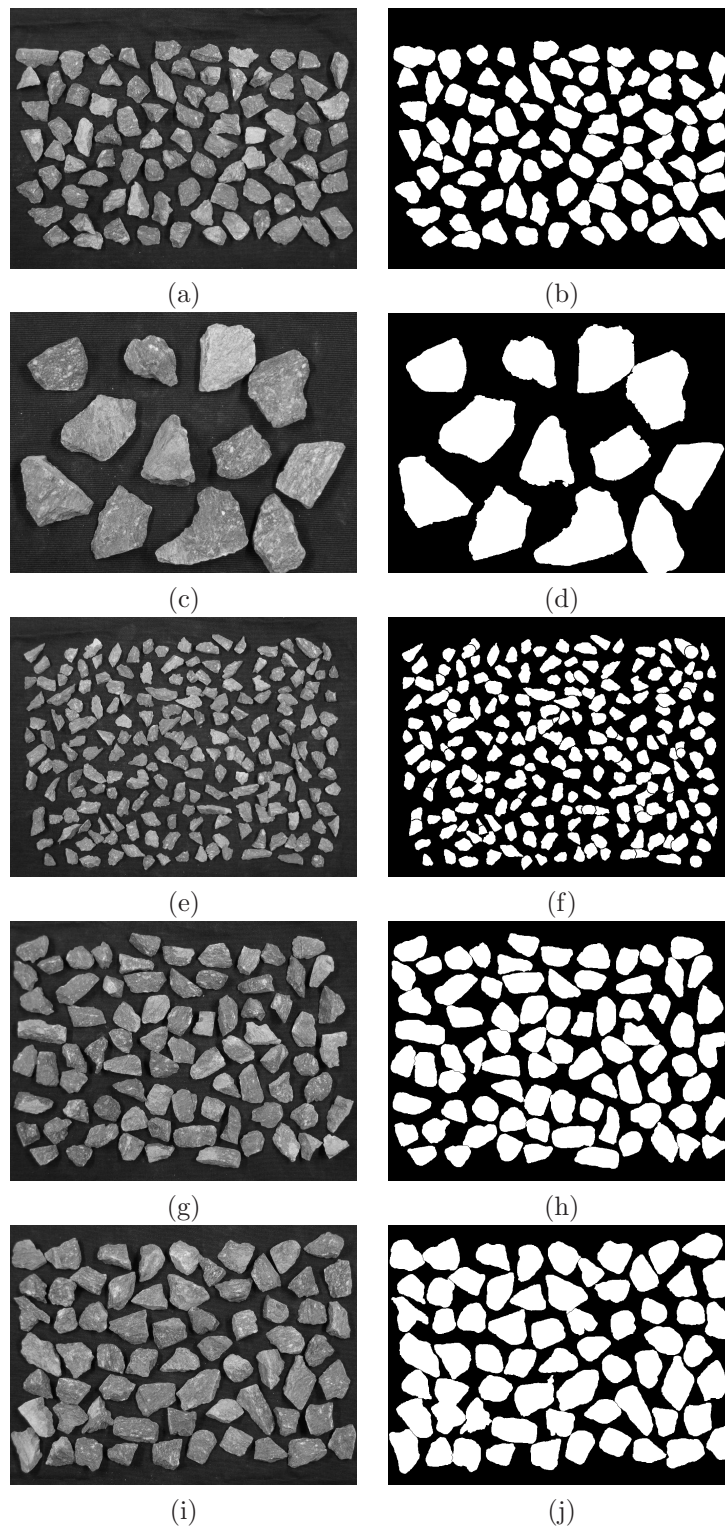


Fig. 5.39: (a) Image P6, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P7, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P8, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P9, (h) Résultat de la segmentation, (i) Image P10, (j) Résultat de la segmentation

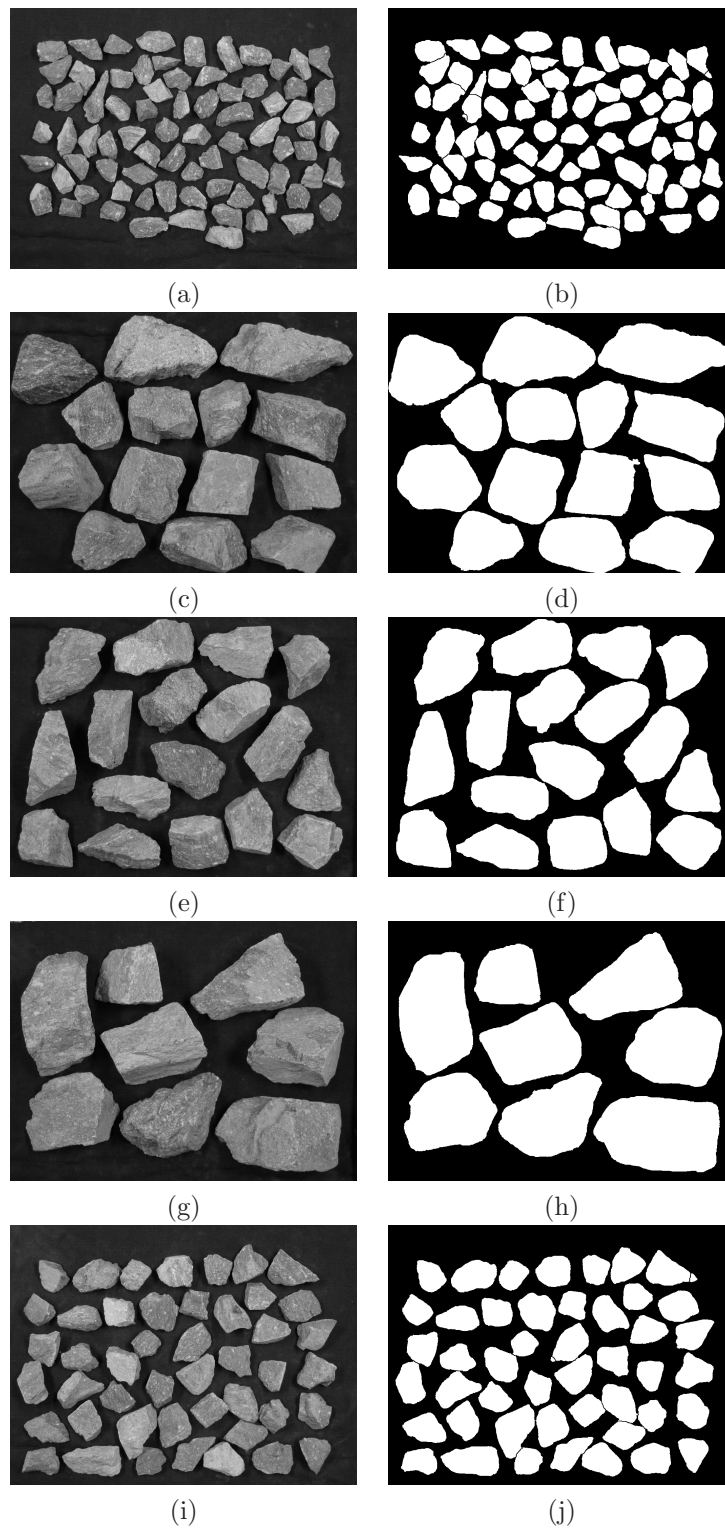


Fig. 5.40: (a) Image P11, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P12, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P13, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P14, (h) Résultat de la segmentation, (i) Image P15, (j) Résultat de la segmentation

Lot N°3 (15 images)		
Taille (mm)	Refus surfaciques (mm^2)	Nombre de grains par classe
3,98	25733	1218
5,25	18948	564
7,44	21777	339
9,22	22839	189
12,05	24290	114
15,43	27404	85
17,66	35197	62
18,68	37326	77
23,04	39888	52
24,19	10680	12
28,49	44680	47
37,97	38462	20
47,36	53257	17
56,64	59481	14
70,39	51974	8

TAB. 5.3: Refus surfaciques et nombre de fragments du lot N°3

2.2 Lot d'images N°4

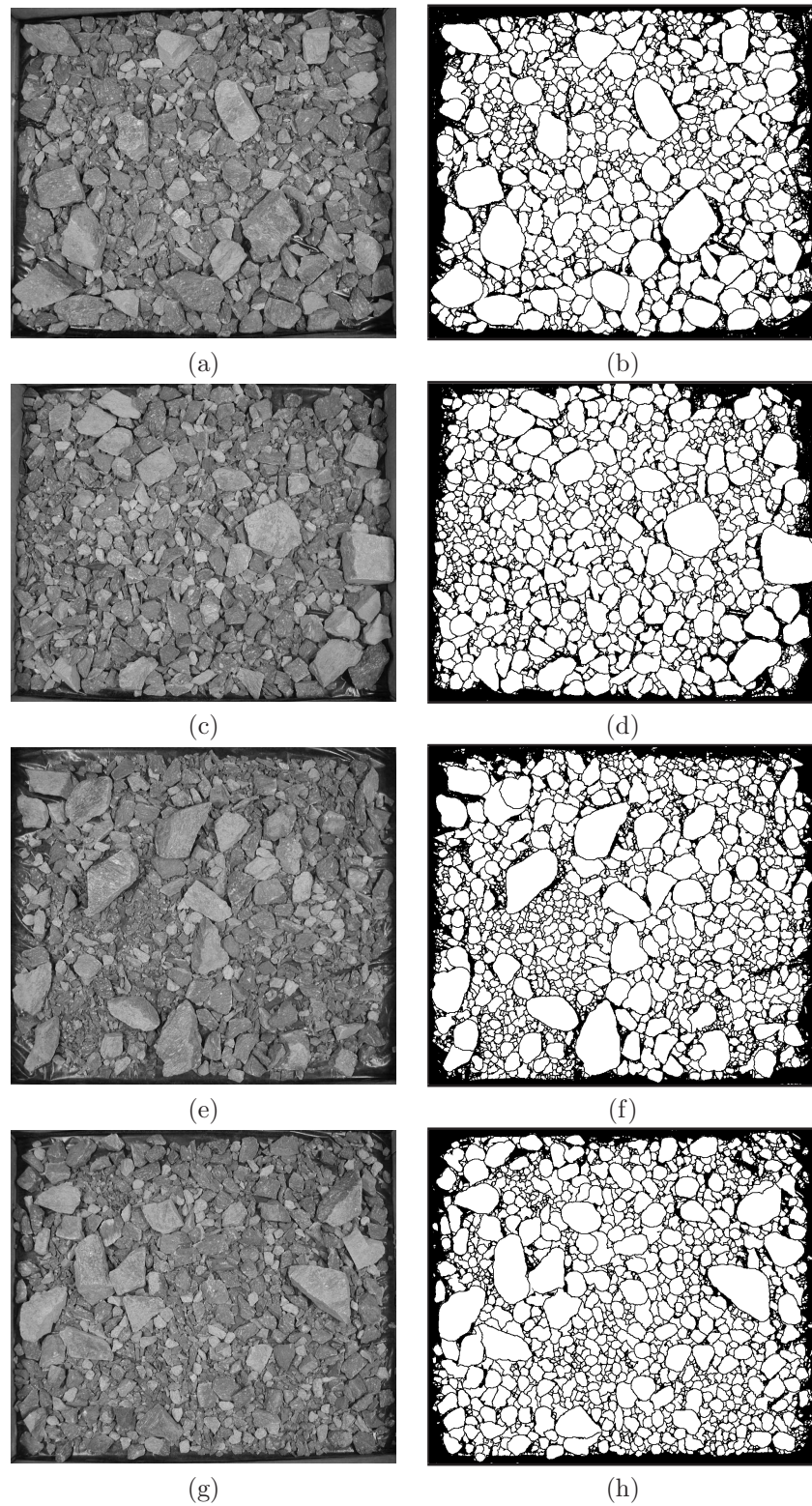


Fig. 5.41: (a) Image P1, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P2, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P3, (f) Résultat de la segmentation, (g) Image P4, (h) Résultat de la segmentation

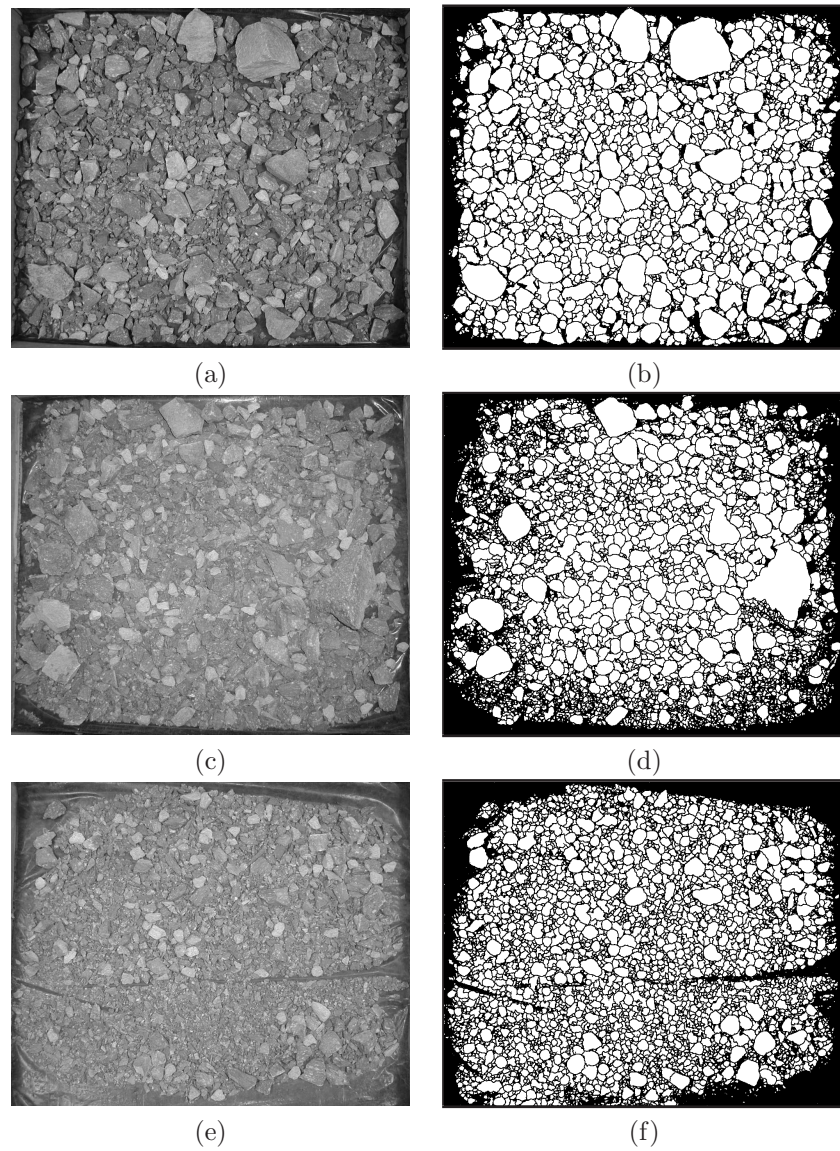


Fig. 5.42: (a) Image P5, (b) Résultat de la segmentation, (c) Image P6, (d) Résultat de la segmentation, (e) Image P7, (f) Résultat de la segmentation

Lot N°4 (Sept images)							
Image	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Taille [cm]	Refus [cm ²]						
0,17	32,35	24,85	36,3	25,32	29,66	88,3	85,14
0,28	28,79	25,44	44,07	31,68	38,94	79,67	110,71
0,39	40,73	32,01	55,4	47,46	62,18	89,33	134,28
0,5	38,42	39,34	61,35	45,12	53,56	77,96	119,51
0,61	46,01	58,58	74,19	73,7	94,04	90,81	160,41
0,72	40,93	56,64	65,34	69,57	74,29	79,75	131,5
0,83	59,85	62,65	89,12	85,75	108,43	69,32	116,88
0,94	64,39	47,52	74,15	84,12	72,14	62,39	77,57
1,05	76,5	87,57	93,81	69,96	79,57	102,31	65,49
1,17	62,24	79,25	78,36	98,54	97,47	107,07	59,65
1,28	73,11	59,17	68,4	95,02	100,37	65,17	47,52
1,39	61,32	87,97	67,18	73	100,07	90,18	42,11
1,5	77,6	74,43	57,26	64,33	62,13	50,63	28,38
1,61	91,32	95,69	68,41	97,02	97,62	46,12	44,35
1,72	33,38	73,51	36,74	82,68	74,08	48,99	27,45
1,83	71,26	59,01	76,75	69,51	83,27	36,85	21,31
1,94	65,5	55,62	52,62	59,04	46,88	28,04	14,28
2,05	63,48	62,87	60,87	56,29	66,66	26,72	0
2,17	26,01	96,47	42,69	42,42	37,01	22,88	18,27
2,28	70,18	48,42	40,95	64,45	34,43	21,97	5,92
2,39	19,67	68,72	37,65	51,77	38,21	0	17,13
2,5	39,34	31,22	37,56	15,22	23,26	16,09	0
2,61	66,82	55,79	32,59	24,14	45,1	0	0
2,72	74,43	59,09	19,03	21,33	31,03	8,83	15,98
2,83	35,62	37,81	22,93	70,02	21,38	9,35	0
2,94	45,42	22,02	20,19	19,77	9,48	10,28	0
3,05	9,59	54,2	19,32	19,65	30,02	10,49	0
3,16	0	25,91	43,27	11,17	0	0	0
3,28	26,12	0	12	0	0	17,84	0
3,39	15,09	14,95	30,51	14,45	12,31	0	0
3,5	12,85	47,47	88,17	0	17,64	15,89	0
3,61	27,71	0	33,4	0	0	17,25	0
3,72	16,97	0	24,8	0	0	0	0
3,83	56,83	35,61	16,79	0	0	0	0
3,94	0	0	0	25,78	0	16,89	0
4,05	0	0	0	60,32	0	0	0
4,16	26,81	18,48	19,15	20,04	0	0	0
4,28	27,02	21,39	0	45,28	20,99	0	0
4,39	46,5	0	83,97	0	0	21,91	0
4,5	23,45	32,54	0	0	23,61	0	0
4,61	0	0	0	26,97	29,1	0	0
4,72	24,29	0	0	40,6	0	0	0
4,83	39,44	0	0	0	0	0	0
4,94	0	0	0	35,85	0	0	0
5,05	0	0	0	0	0	0	0

5,16	0	0	0	0	0	0	0
5,27	66,07	0	45,58	0	0	0	0
5,39	0	0	0	0	0	0	0
5,5	0	0	0	0	0	0	0
5,61	0	0	43,27	0	0	0	0
5,72	0	0	0	0	0	0	0
5,83	0	0	0	47,57	0	0	0
5,94	0	0	0	0	0	0	0
6,05	0	0	0	0	0	0	0
6,16	0	0	0	0	0	0	0
6,27	44,05	0	51,52	0	0	0	0
6,38	0	0	0	0	0	0	0
6,5	51,15	0	0	0	0	58,7	0
6,61	0	0	0	0	0	0	0
6,72	0	0	0	0	0	0	0
6,83	0	0	0	0	0	0	0
6,94	0	0	0	0	0	0	0
7,05	0	0	0	0	0	0	0
7,16	0	104,64	0	0	0	0	0
7,27	0	0	0	0	0	0	0
7,31	0	0	0	0	57,34	0	0

TAB. 5.4: Refus surfaciques équivalents
aux images du lot $N^{\circ}4$